

ABSCHLUSSBERICHT PILOTPROJEKT

Entwicklung ressourcenschonender Entleerungsstrategien zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Regenbecken ohne Dauerstau als Element zur Umsetzung der WRRL

im Trennsystem der Stadt Hennef

Stadtbetriebe Hennef

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	4
2	Literaturstudie zu Möglichkeiten der online-AFS Messung in Niederschlagswasser	6
3	Systembeschreibung	8
3.1	Einzugsgebiet	8
3.2	Bauwerke	9
3.2.1	Regenklärbecken	10
3.2.2	Filterschacht	11
3.3	Messtechnik	12
3.3.1	Messtechnik im RKB	12
3.3.2	Messtechnik im Übergabeschacht	13
3.3.3	Messtechnik im Mess- und Schieberschacht	13
3.3.4	Messtechnik im Filterschacht	14
3.4	Steuerung des Systems	15
3.4.1	Klarwasserabzug	15
3.4.2	Restentleerung	16
3.4.3	Fremdwasserabzug	17
4	Praktische Umsetzung des Pilotprojekts	19
4.1	Messzeitraum	19
4.2	Einrichtung und Inbetriebnahme der Messstellen	19
4.2.1	Installation der Spektrometersonde	19
4.2.2	Kalibrierung der Spektrometersonde	22
4.2.3	Installation des automatischen Probenehmers	22
4.3	Messstellenbetrieb und Probenahme	23
4.3.1	Sondenwartung	23
4.3.2	Filterwartung	24
4.3.3	Analyseprogramm	25
4.3.4	Programmierung des Probenehmers	26
5	Ergebnisse der messtechnischen Überwachung der Entleerungsstrategie	27
5.1	Datenverfügbarkeit	27
5.2	Entleerungsereignisse	28
5.3	Korrelation von Trübung und AFS	30
5.4	Trübungsmessung	32

5.5	Verteilung des Entleerungsvolumens	33
5.6	Laboranalysen	35
5.6.1	Probenahmen	35
5.6.2	Validierung der Online-Messung	37
5.6.3	Analyse der Verschmutzungsparameter	38
5.6.4	Organische Spurenstoffe	40
5.6.5	Biofilmanalyse	41
5.7	Filterbetrieb	41
6	Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von online-Spektrometermessungen und online-Trübungsmessungen	43
7	Bewertung der Wirkung und Wartungserfordernisse eines Filtersystems in der Entleerungsleitung der Regenwasserbehandlungsanlage	44
8	Vorschlag einer Betriebsstrategie	47
9	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	49
10	Zusammenfassung	51

1 Veranlassung und Zielsetzung

Die Stadtbetriebe Hennef AöR betreiben im Kanalnetz der Stadt Hennef zahlreiche Regenklärbecken, um die Anforderungen des Trennerlasses NRW (Trennerlass, 2004) zu erfüllen. Alle neueren Bauwerke zur Regenwasserbehandlung werden dabei ohne Dauerstau betrieben, da Bauwerke mit Dauerstau aus ökologischer Sicht als weniger wirksam eingestuft werden (DWA, 2013).

Die Umsetzung und Inbetriebnahme der zahlreichen Bauwerke und deren Anschluss an die Schmutz- und Mischwassernetze und damit die Kläranlage führt zu einer erhöhten hydraulischen Belastung der Pumpstationen, des Kanalnetzes und der Kläranlage selbst mit i.d.R. kaltem und zeitlich sehr unterschiedlich verschmutztem Niederschlagswasser. Als Folge sind ungünstige Gesamtemissionen anzunehmen und ein steigender Energiebedarf zu beobachten. Erhöhte Belastungen treten auf, wenn Regenbecken in Netzen erstellt werden, die dann zur Kläranlage geleitet werden (Drainagen, Außengebiete etc.)

Diese Randbedingungen haben dazu geführt, dass die Stadtbetriebe in einem ersten Schritt eine stadtgebietsweite integrierte Entleerungsstrategie entwickelt haben, die eine optimierte Entleerung der Bauwerke unter hydraulischen Gesichtspunkten sicherstellt (Prien und Kaletka, 2013). Diese Strategie beruht bisher auf einer vollständigen sukzessiven Entleerung der Bauwerke nach Regenende und wurde nach LWG 58.1 angezeigt und umgesetzt.

Die bisherige Steuerungsstrategie beinhaltet jedoch noch keine Berücksichtigung der Verunreinigung des Niederschlagswassers. Zahlreiche Messungen der Abflussverschmutzung zeigen, dass insbesondere zu Beginn von Regenereignissen sehr hohe Verschmutzungen gemessen werden und die Belastung über die Regendauer abnimmt (Literaturhinweis).

In der Neuauflage des Arbeitsblatts DWA-A 166 wird darüber hinaus explizit empfohlen, zu „prüfen, ob es zweckmäßig ist, die sich nach Regenende ausbildende, von absetzbaren Stoffen freie Zone in das Gewässer zu entleeren“ (DWA, 2013).

Aktuelle Untersuchungen zeigen zudem, dass die Leistungsfähigkeit von klassischen Regenklärbecken deutlich unter denen von Retentionsbodenfiltern und dezentralen Anlagen mit serienmäßigen Zulassungen (LANUV Liste bzw. DIBT) liegen. Zur Umsetzung der Vorgaben der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie ist es daher angebracht die Vorteile einer zentralen Behandlung des Niederschlagswassers in großen Einzugsgebieten mit denen der dezentralen Systeme zu kombinieren. Hierzu bieten sich die Kombinationen von Absetzanlagen mit nachgeschalteten Filtern, z.B. für die Beckenentleerung an. Im

Rahmen des Projektes soll auch die Zusammensetzung der abfiltrierbaren Stoffe (AFS – AFS_{fein}) berücksichtigt werden.

Ausgehend von diesen Randbedingungen werden in dem Pilotprojekt übergeordnet die nachfolgenden Ziele verfolgt:

- Ziel 1: Entwicklung einer optimierten Entleerungsstrategie unter stofflichen und hydraulischen Gesichtspunkten zur Reduktion der Gewässerbelastung als Element zur Umsetzung der Vorgaben der WRRL sowie der Minimierung des Energieverbrauchs (Klimaschutz).
- Ziel 2: Umsetzung der Entleerungsstrategie und Bewertung der Ergebnisse durch eine messtechnische Überwachung.
- Ziel 3: Recherche zu Möglichkeiten der online-AFS Messung in Niederschlagswasser.
- Ziel 4: Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von online-Spektrometernmessungen und Online-Trübungsmessungen zur Ermittlung der Verschmutzung von Niederschlagswasser.
- Ziel 5: Bewertung der Wirkung und Wartungserfordernisse eines Filtersystems in der Entleerungsleitung der Regenwasserbehandlungsanlage.

Die einzelnen Ziele sind fachlich eng miteinander verknüpft. Als Leitparameter werden die abfiltrierbaren Stoffe (AFS bzw. AFS_{fein}) zu Grunde gelegt.

Die Untersuchungen bilden damit eine entscheidende Grundlage zur mittelfristigen Weiterentwicklung des Betriebs der übrigen Regenbecken mit dem Ziel einer flexiblen, anpassungsfähigen emissions- und immissionsorientierten Betriebsweise.

Das Projekt soll die messtechnischen Grundlagen zur AFS-Messung im Niederschlagswasser bereitstellen und damit als Grundlage weiterer Untersuchungen des LANUV dienen.

Mit der verschmutzungsabhängigen gesteuerten Betriebsweise werden sich neben Maßnahmen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie insbesondere auch unter den Aspekten Klimaschutz (Energieeinsparung durch verminderte Pumpenlaufzeiten) und Klimaanpassung (Berücksichtigung von Aspekten der Überflutungsvorsorge im Rahmen der Betriebsstrategie) deutliche Vorteile gegenüber einem statischen System ergeben. Diese Aspekte sollen in dem Pilotprojekt u. a. durch eine Energiebilanzierung herausgearbeitet und dokumentiert werden.

2 Literaturstudie zu Möglichkeiten der online-AFS Messung in Niederschlagswasser

Die abfiltrierbaren Stoffe (AFS) wurden im DWA Arbeitsblatt 102 (DWA, 2016) als Referenzparameter in der Regenwasserbewirtschaftung ausgewählt. Für eine kontinuierliche Messung der AFS ist die Laboranalytik nicht ausreichend, so dass online-Messtechniken zum Einsatz kommen. Dabei ist zu beachten, dass für die Verwendung von Messtechnik in Entwässerungssystemen eine Atex-Zulassung erforderlich ist.

Auf nationaler und internationaler Ebene wurden in den vergangenen Jahren diverse online AFS-Messungen mithilfe von Spektrometer- und Trübungssonden durchgeführt.

Bei spektrometrischen Messungen wird ein Lichtstrahl durch eine Flüssigkeit hindurch gesendet und durch darin enthaltene Substanzen abgeschwächt. Von einem Detektor wird erfasst wie viel Licht dabei absorbiert wurde (s::can Messtechnik GmbH, 2018). Je nach Hersteller und Sondentyp kann dabei die Absorption im Wellenlängenbereich von 200 bis 750 nm detektiert werden. Auf diese Weise kann eine Vielzahl von Äquivalenz-Konzentrationen mit Spektrometersonden bestimmt werden (z.B. AFS_{eq} , NO_3-N_{eq} , CSB_{eq}).

In diversen Praxiseinsätzen kamen und kommen Spektrometersonden erfolgreich zur Bestimmung von AFS zum Einsatz. In NRW liegen Erfahrungen mit dem Einsatz von Spektrometermessungen insbesondere in Wuppertal (Raith et al., 2017) und Köln (Messprojekt mit Bezirksregierung Köln) vor. Beide Messprogramme werden u. a. auch von der Dr. Pecher AG begleitet.

Beim Einsatz von Spektrometersonden ist es besonders wichtig, den Messspalt frei von Ablagerungen zu halten, da es andernfalls zu einem Drift der Messwerte kommt. Die Reinigung erfolgt durch eine automatische Druckluftreinigung. Zusätzlich sollte die Sonde in regelmäßigen Abständen händisch von gröberen Verschmutzungen befreit werden. Trotz regelmäßiger Reinigung kann es zu einem Langzeitdrift der Messwerte kommen. Aus diesem Grund sollte ein regelmäßiger Nullpunktgleich mit destilliertem Wasser stattfinden (Gruber et al., 2008).

Zur Berechnung der Äquivalenz-Konzentrationen werden vom Hersteller globale Kalibrierungen angeboten. Diese basieren auf einer Vielzahl unterschiedlicher Datensätze und liefern häufig relativ gute Übereinstimmungen mit Labormesswerten. Die Äquivalenz-Konzentrationen sollten aber auf jeden Fall durch Laboranalysen validiert werden (Gruber et al., 2008).

Die Anzahl der Proben zur Validierung der Messergebnisse ist abhängig vom Konzentrationsbereich. Für eine stabile Kalibrierung sollten unterschiedliche Ereignisse

beprobte werden, die den gesamten Wertebereich an der Messstelle abdecken (Caradot et al., 2014).

Bei der Trübungsmessung wird die Trübung einer Flüssigkeit, verursacht durch die Gegenwart ungelöster Substanzen, gem. Din EN ISO 7027 mittels Streulicht- oder Durchlichtmessung erfasst. Trübungen, die nach dem Streulichtverfahren bestimmt werden, werden in Formazin-nephelometrischen Einheiten (FNU) angegeben. Die Messung eignet sich vor allem für Flüssigkeiten mit geringer Trübung im Wertebereich von 0 FNU bis ca. 40 FNU. Die Durchlichtmessung ist besser für stark trübe Flüssigkeiten geeignet. Dabei wird die Trübung in Formazin-Schwächungseinheiten (FAU) angegeben. Der Wertebereich liegt zwischen 40 FAU und 400 FAU. (DIN EN ISO 7027, 2016)

Im Rahmen verschiedener Messprogramme wurden Trübungssonden zur Messung in Mischwasserkanälen, Regenwasserkanälen und Fließgewässern eingesetzt. Erfolgreiche Anwendungen wurden u.a. in folgenden Publikationen dokumentiert:

- Hannouche et al. (2011), Bertrand-Krajewski (2004): Einsatz im Mischwasserkanal
- Sun et al. (2015): Einsatz im Regenwasserkanal
- Rügner et al. (2013), Lawler et al. (2006): Einsatz im Fließgewässer

Da bei der Trübungsmessung nicht direkt der AFS-Gehalt ermittelt wird, ist es wichtig, dass die beiden Parameter eine gute Korrelation aufweisen. Nur so können Rückschlüsse auf den tatsächlichen AFS-Gehalt gezogen werden. Gute lineare Zusammenhänge von Trübung und AFS können in diversen Praxiseinsätzen festgestellt werden. Gleichzeitig kommt es aber trotz guter Korrelation beim Einsatz verschiedener Trübungssonden zu unterschiedlichen Messergebnissen. Somit kann eine Trübungsmessung nur als zuverlässiger Ersatz für eine AFS-Messung verwendet werden, wenn zuvor ein für den Einsatzort spezifischer Zusammenhang von Trübung und AFS hergestellt wird (Rymaszewicz et al., 2017).

3 Systembeschreibung

3.1 Einzugsgebiet

Das RKB Fährstraße liegt im Stadtteil Stoßdorf südlich des Siegvorlandes. Das Einzugsgebiet umfasst neben dem Stadtteil Stoßdorf die im Osten daran angrenzenden Gewerbeflächen und wird im Süden durch die Bahnstrecke sowie im Südosten durch die A560 und im Westen durch die Stadtgrenze begrenzt. Die kanalisierte Einzugsgebietsgröße $A_{E,k}$ beträgt rd. 114 ha.

Das Einzugsgebiet ist im Westen vornehmlich durch Wohnbebauung und im Osten durch Gewerbeflächen geprägt. Es umfasst Flächen der Kategorien 1 und 2 gemäß Trennerlass und spiegelt damit typische Nutzungen in einem Stadtgebiet wieder.

Tabelle 1 Zusammenstellung der befestigten Flächen $A_{E,b}$ in (ha)

Bezeichnung	Istzustand	Prognosesituation
Kategorie 1 (nicht klärpflichtig)	23,81 ha	26,00 ha
Kategorie 2 (klärpflichtig)	28,18 ha	31,00 ha
Summe befestigte Fläche $A_{E,b}$	51,99 ha	57,00 ha

Die Entwässerung im Einzugsgebiet des RKB Fährstraße erfolgt im Trennsystem. Im Südosten des Gebietes befindet sich jedoch ein RÜB (RÜB 705 Reutherstraße), wodurch bei stärkeren Niederschlagsereignissen verdünntes Mischwasser aus einem südlich gelegenen Einzugsgebiet über eine Entlastungsschwelle in den Regenwasserkanal im Einzugsgebiet des RKB Fährstraße gelangen kann. Das RÜB verfügt über ein Speichervolumen von 400 m³ und leitet gedrosselt 60 l/s in den weiterführenden Schmutzwasserkanal ein. Ab einem Wasserstand von 65,00 mNN erfolgt ein Abschlag über ein Streichwehr in den Regenwasserkanal, welcher im weiteren Verlauf an das RKB Fährstraße angeschlossen ist.

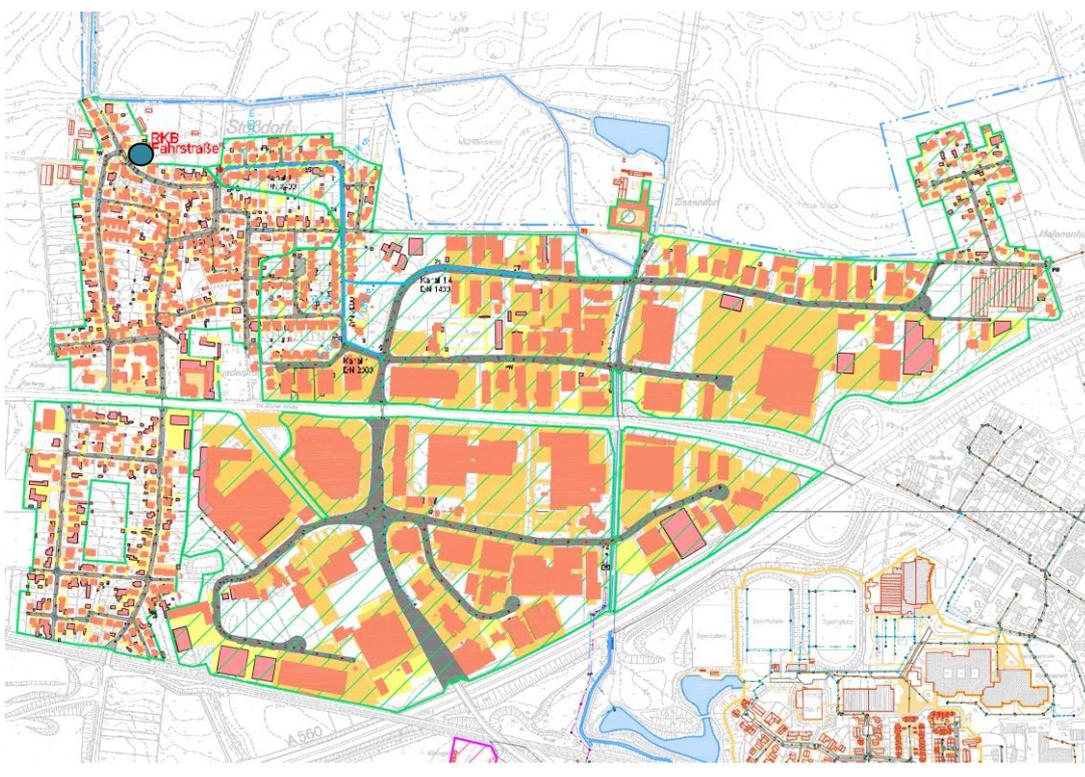


Bild 1 Einzugsgebiet des RKB Fahrstraße in Hennef (Quelle: Stadtbetriebe Hennef/Dr. Pecher AG)

3.2 Bauwerke

Das System zur Regenwasserbehandlung besteht aus einem Regenklärbecken und einem technischen Regenwasserfilter. Zur Steuerung gehören außerdem ein Mess- und Schieberschacht sowie ein Schaltschrank zum System (Bild 2).

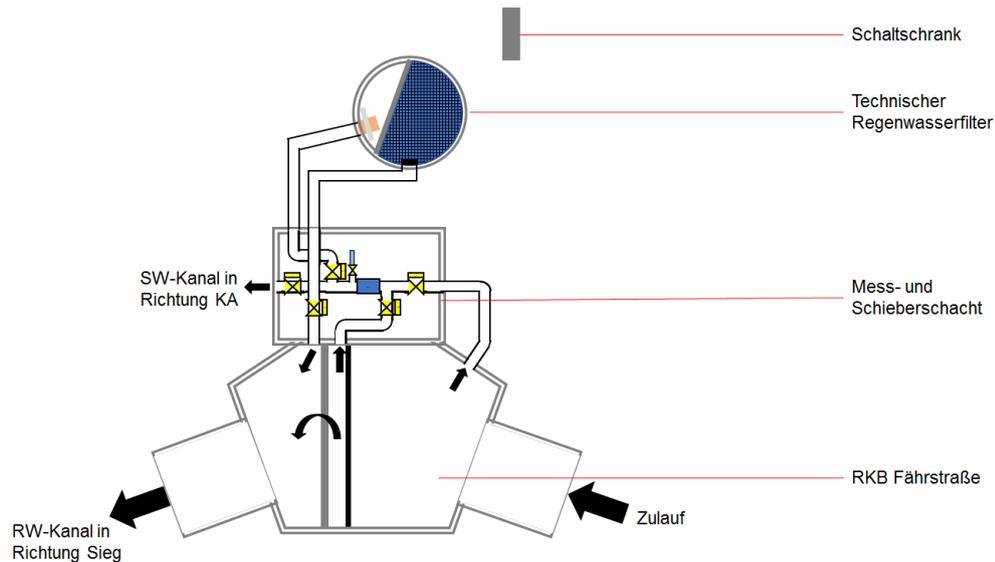


Bild 2 Systemübersicht Niederschlagswasserbehandlung Fahrstraße

3.2.1 Regenklärbecken

Bei dem RKB Fahrstraße handelt es sich um einen Stauraumkanal (DN 2400) mit untenliegender Entlastung. Im Entlastungsbauwerk des RKB gibt es zwei Auslässe, die mittels Schiebern geöffnet und geschlossen werden können. Der erste Auslass befindet sich vor der Überlaufschwelle hinter einer Tauchwand und wird für den Abzug der sich nach Regenende bildenden Klarwasserschicht verwendet. Die zweite Öffnung befindet sich ca. 50 cm über der Sohle des RKB und dient dem Fremdwasserabzug und der Restentleerung (Bild 3).

Beide Entleerungsleitungen führen den Abfluss über einen MID-geregelten Schieber mit 20 l/s gedrosselt je nach aktivem Programm in den SW-Kanal oder in den Filterschacht. Der Klärüberlauf aus dem Becken wird direkt in die Sieg eingeleitet.

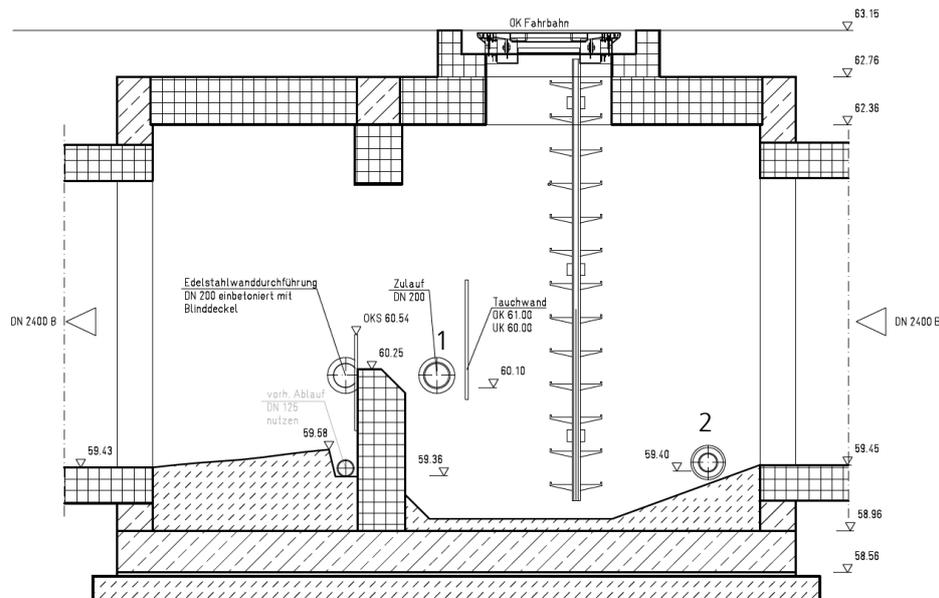


Bild 3 Schnitt durch das RKB Fahrstraße (Quelle: Stadtbetriebe Hennef/Dr. Pecher AG)

3.2.2 Filterschacht

Im Rahmen des Pilotprojekts wurde ein Filterschacht (DN 2200, Beton, System FiltaPex) gebaut, durch den der Klarwasserabzug während der Pilotphase vor der Einleitung in die Sieg geführt werden sollte. Bild 4 zeigt einen Schnitt durch den Filterschacht sowie den Grundriss. Die Fläche des Filters beträgt ca. 2,5 m². Basierend auf Erfahrungswerten wird ein zweistufiger Filter verwendet. Die erste Lage besteht aus zwei Schichten grobem Calcium Silikat Hydrat (CSH), angeordnet als lose Schüttung in Wäschesäcken. Darauf wurde eine grobe Schaumstoff-Filtermatte angebracht und mit Gitterrostelementen als Auftriebssicherung fixiert. Die bauliche Ausführung weicht geringfügig von den herkömmlichen Systemen ab. Im Zulauf befindet sich kein strömungsberuhigendes Element.

3.3.2 Messtechnik im Übergabeschacht

Im Übergabeschacht zum Schmutzwasserkanal wird durch eine Niveaumessung und einen Schwimmerschalter ein potentieller Rückstau im Schmutzwasserkanal erfasst. Liegt kein Rückstau vor erfolgt die Freigabe der Entleerung des RKB, hierbei erfolgt die Steuerung ausschließlich über die Niveaumessung.

3.3.3 Messtechnik im Mess- und Schieberschacht

Die tatsächliche Entleerung und der Klarwasserabzug werden über die Schieber im Mess- und Schieberschacht gesteuert. In diesem Schacht befinden sich die Schieber S1 bis S5, inklusive Antriebe und Tauchmotorpumpe zur Schachtentwässerung. Tabelle 2 zeigt die Funktionen der einzelnen Schieber und Bild 5 den Mess- und Schieberschacht. Die Schieber S2 und S5 dienen als Regelschieber, die übrigen Schieber als Absperrschieber. In der Rohrleitung im Schacht wird mittels eines MID der Durchfluss gemessen. Damit kann der Durchfluss in den Schmutzwasserkanal und der Durchfluss zum Filterschacht erfasst werden.

Tabelle 2 Übersicht über Kennzeichnung, Antriebsart und Funktionen der Schieber im Mess- und Schieberschacht

Schieber	Kennzeichnung	Antriebsart	Funktion
S1	754_M_SB001	E-Stellantrieb	Restentleerung RKB
S2	754_M_SR001	E-Regelantrieb	Entleerung Richtung SW-Kanal
S3	754_M_SB002	E-Stellantrieb	Klarwasserabzug
S4	754_M_SB003	E-Stellantrieb	Entleerung Richtung RW-Kanal/E1
S5	754_M_SR002	E-Regelantrieb	Zulauf Filterschacht

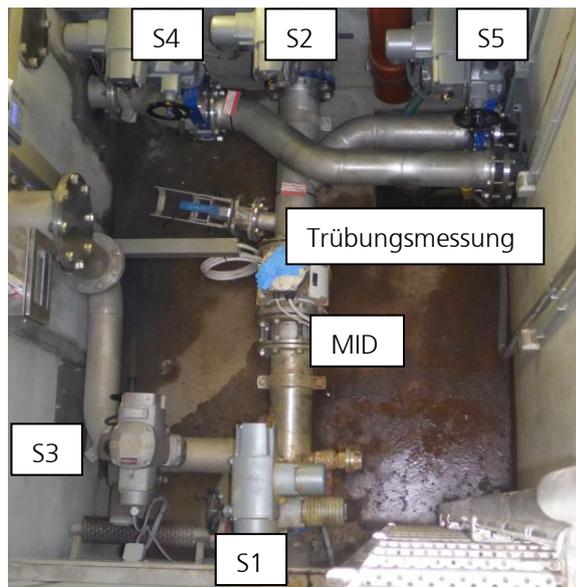


Bild 5 Blick in den Mess- und Schieberschacht mit den Schiebern S1 bis S5, der MID- und der Trübungsmessung

Zusätzlich wird über eine Trübungssonde des Unternehmens Hach Lange die Trübung in der Einheit FNU gemessen. Hierdurch erfolgt eine qualitative Bestimmung von Schmutz-, Fremd- und Klarwasserabzug. Es handelt sich um eine Sonde vom Typ Solitax inline sc Einbausonde mit einem automatischen Wischer für einen Messbereich von 0,001 bis 4.000 FNU. Die Sonde benutzt eine farzunabhängige Messmethode mit einem Zweistrahl-Infrarot/Streulicht-Photometer. Die Ansprechzeit der Sonde ist variabel zwischen 1 bis 300 s einstellbar. Der Wartungsaufwand beläuft sich nach Herstellerangabe auf eine Wartung pro Monat.

Eine Stabsonde misst als konduktive Füllstandsmessung den Füllstand im Schacht und erfasst somit Überflutungen im Mess- und Schieberschacht. Bei Erfassung einer Überflutung erfolgt die Ansteuerung der Schachtentwässerungspumpe.

3.3.4 Messtechnik im Filterschacht

Der technische Regenwasserfilter ist ebenfalls mit Messtechnik ausgestattet. Hier messen zwei Drucksonden den Füllstand in der Zu- und Ablaufkammer. Über diese Messwerte

kann die Funktion des Filters überprüft werden. Steigende Höhenunterschiede zeigen den Anstieg hydraulischer Verluste und die Kolmation des Filtermaterials.

Des Weiteren ist in der Zulaufkammer eine Spektrometersonde vom Typ spectro::lyser™ der Fa. s::can verbaut. Diese Sonde funktioniert nach dem Prinzip der UV-Vis Spektrometrie und kann eine individuelle Auswahl verschiedenster Parameter, wie beispielsweise AFS_{eq} , Trübung, NO_3-N , CSB_{eq} , BSB_{eq} , TOC_{eq} und UV254 messen. Zur Vermeidung von Ablagerungen im Messspalt ist die Sonde mit einer automatischen Druckluftreinigung ausgestattet.

3.4 Steuerung des Systems

Durch den Abfluss eines Niederschlagsereignisses beginnt sich das Regenbecken zu füllen. Sobald das maximale Volumen von 662 m³ erreicht ist, erfolgt ein Abschlag über den Klärüberlauf in den anschließenden Regenwasserkanal. Über diesen Regenwasserkanal erfolgt ein Transport zur Einleitstelle E1 und somit in den Vorfluter.

Die anschließende Entleerung des Systems erfolgt nach einer festgelegten Betriebsweise. Es gibt drei verschiedene Steuerungsprogramme mit denen eine (Teil-) Entleerung des Regenklärbeckens erreicht wird.

3.4.1 Klarwasserabzug

Durch Absetzvorgänge im Regenklärbecken kann sich nach einem Ereignis eine Klarwasserzone ausbilden, die weitgehend frei von absetzbaren Stoffen ist. Sobald bestimmte Randbedingungen erfüllt sind, wird die Klarwasserzone über den Klarwasserabzugsschieber in die Rohrleitung des Mess- und Schieberschachts angeleitet. Die erforderlichen Bedingungen werden in Tabelle 3 dargestellt. Im Mess- und Schieberschacht erfolgt zunächst für einige Minuten ein direkter Abfluss in den angrenzenden Schmutzwasserkanal. Über den Regelschieber S2 wird der Abfluss gedrosselt. Unterschreitet der Trübungswert einen bestimmten Sollwert (50 FNU) wird der Abfluss in den Schmutzwasserkanal abgebrochen und es öffnen sich die Schieber S4 und S5. Dadurch erfolgt ein geregelter Abfluss in den technischen Regenwasserfilter und ein anschließender Ablauf in den Regenwasserkanal. Wird der Grenzwert wieder überschritten erfolgt eine Umschaltung. Die Schieber S4 und S5 werden geschlossen und der Regelschieber S2 aktiviert. Es erfolgt ein erneuter Abfluss in den Schmutzwasserkanal. Die Bedingungen für das Ende des Klarwasserabzugs sind ebenfalls der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3 Randbedingungen für Freigabe und Ende des Klarwasserabzugs

Freigabe	Ende
Freigabe durch Kläranlage	Steigender Füllstand im RKB
Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist überschritten	Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist unterschritten
Klärüberlauf ist beendet (Grenzwert unterschritten)	Klärüberlauf ist aktiv (Grenzwert überschritten)
Kein Rückstau im SW-Kanal	Rückstau im SW-Kanal
Kein Rückstau im RW-Kanal	Rückstau im RW-Kanal
Einwandfreie Datenübertragung	
Beendigung des Regenereignisses	
Kein steigender Füllstand im RKB	

3.4.2 Restentleerung

Nachdem der Klarwasserabzug beendet ist, beginnt die Restentleerung des Systems. Die Bedingungen für die Freigabe und das Ende dieses Programms sind der Tabelle 4 zu entnehmen. Die Restentleerung beginnt mit dem Öffnen des Schiebers S1. Der dadurch entstehende Abfluss wird über den Regelschieber S2 auf einen einstellbaren Durchfluss geregelt und in den Schmutzwasserkanal abgeleitet. Die Restentleerung des Systems erfolgt ausschließlich in den Schmutzwasserkanal.

Tabelle 4 Randbedingungen für Freigabe und Ende der Restentleerung

Freigabe	Ende
Freigabe durch Kläranlage	Steigender Füllstand im RKB
Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist überschritten (1 cm Hysterese)	Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist unterschritten (1 cm Hysterese)
Klarwasserabzug ist nicht möglich	Klarwasserabzug ist aktiv
Kein Rückstau im SW-Kanal	Rückstau im SW-Kanal
Einwandfreie Datenübertragung	
Beendigung des Regenereignisses	
Kein steigender Füllstand im RKB	
Schieber S3 ist nicht für Automatik bereit	

3.4.3 Fremdwasserabzug

Der dauerhafte Fremdwasseranfall zum System wird auf bis zu 0,3 l/s geschätzt. Dieser Zufluss würde ohne einen Fremdwasserabzug zu einem dauerhaften Einstau bzw. einem dauerhaften Befüllungsvorgang führen. Deshalb ist ein Fremdwasserabzug über den Schieber (S1) hinterlegt. Das Fremdwasser wird messtechnisch über den MID und die Trübungsmessung erfasst. Wie beim Klarwasserabzug geschieht hier eine qualitätsabhängige Ableitung über den Schmutz- oder Regenwasserkanal. Die Bedingungen für die Freigabe und das Ende des Programms sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5 Randbedingungen für Freigabe und Ende des Fremdwasserabzugs

Freigabe	Ende
Freigabe durch Kläranlage	Steigender Füllstand im RKB
Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist überschritten	Softwaregrenzwert für den Füllstand im RKB ist unterschritten
Kein Rückstau im SW-Kanal	Rückstau im SW-Kanal
Kein Rückstau im RW-Kanal	Rückstau im RW-Kanal
Einwandfreie Datenübertragung	Abfluss in den RW- oder SW-Kanal ist zu gering
Beendigung des Regenereignisses	Abfluss in den RW- oder SW-Kanal ist zu hoch
Kein steigender Füllstand im RKB	

4 Praktische Umsetzung des Pilotprojekts

4.1 Messzeitraum

Die Vorarbeiten für die praktische Phase des Pilotprojekts sind Ende 2016 abgeschlossen und die in Kap. 3.4 beschriebene Steuerung in Betrieb genommen worden. Im Januar 2017 wurde die Spektrometersonde, wie geplant in der Zulaufkammer des Filterschachts installiert und mit der online-AFS Messung begonnen. Die Messungen wurden nach einem Jahr Messdauer im Januar 2018 abgeschlossen

4.2 Einrichtung und Inbetriebnahme der Messstellen

4.2.1 Installation der Spektrometersonde

Die Spektrometersonde wurde zu Projektbeginn am unteren Ende einer senkrechten Stange in der Zulaufkammer des Filterschachts so befestigt, dass sie dauerhaft im Wasser eingetaucht war. Die Stange wurde, wie in Bild 6 zu sehen, im Schachthals eingehängt, was ein Herausnehmen der Sonde für die regelmäßige Wartung durch die Dr. Pecher AG ermöglichte. Für eine bessere Vergleichbarkeit der AFS-Messung im Filterschacht mit der Trübungsmessung in der Entleerungsleitung des RKB, wurde die Halterung der Sonde nach Auswertung der ersten Ereignisse näher an den Zulauf des Filterschachts verschoben.

Am 20.06.2017 wurde die Sondenposition zu Gunsten der Datenqualität noch einmal verändert. Auf die senkrechte Befestigungsstange wurde komplett verzichtet. Stattdessen wurde die Zulaufleitung in den Schacht hinein verlängert und die Sonde direkt in der verlängerten Zulaufleitung positioniert (Bild 7).

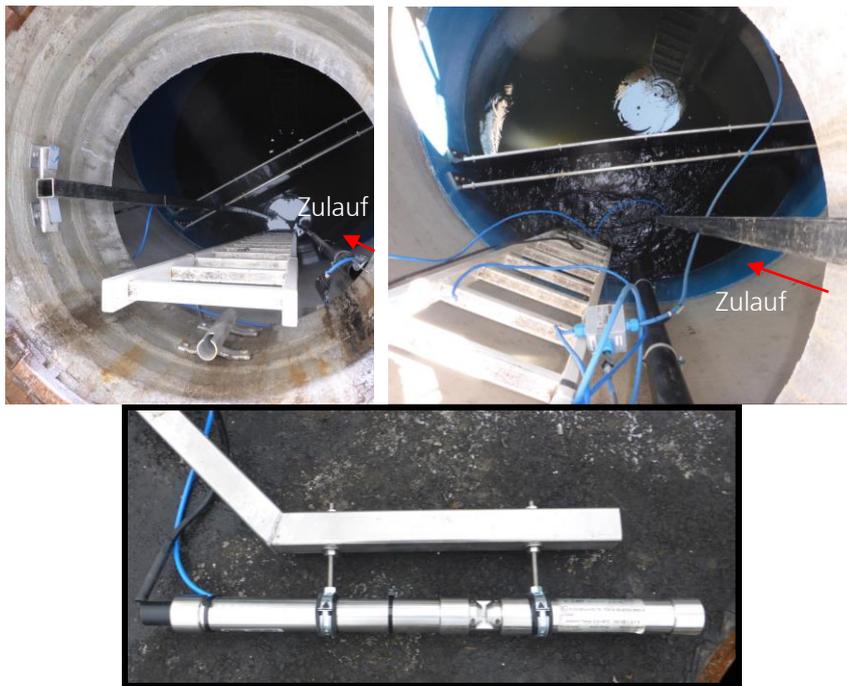


Bild 6 oben: Blick in den Filterschacht Fährstraße. Position der herausnehmbaren Sondenhalterung bei Projektbeginn (links) und nach Umbau (rechts). Unten: Befestigung der Spektrometersonde.

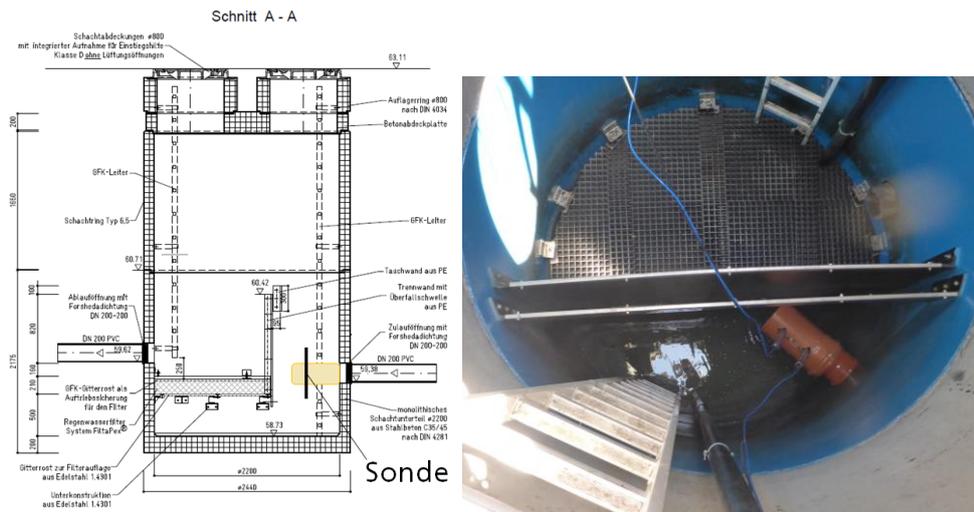


Bild 7 Position der Spektrometersonde im Filterschacht Fahrstraße seit dem 20.06.2017.

Zur Datenverwaltung und Steuerung der Sonde wurde das Bediengerät con::cube im Schaltschrank installiert. Darüber wurde auch die Übertragung der erfassten AFS-Konzentrationen an das Leitsystem der Stadtbetriebe Hennef ermöglicht.

Die Sonde verfügt über die Möglichkeit einer automatischen Druckluftreinigung. Zu diesem Zweck wurde im Schaltschrank ein Kompressor bereitgestellt, der mittels Zeitschaltuhr über Nacht aus Lärmschutzgründen abgeschaltet wurde.

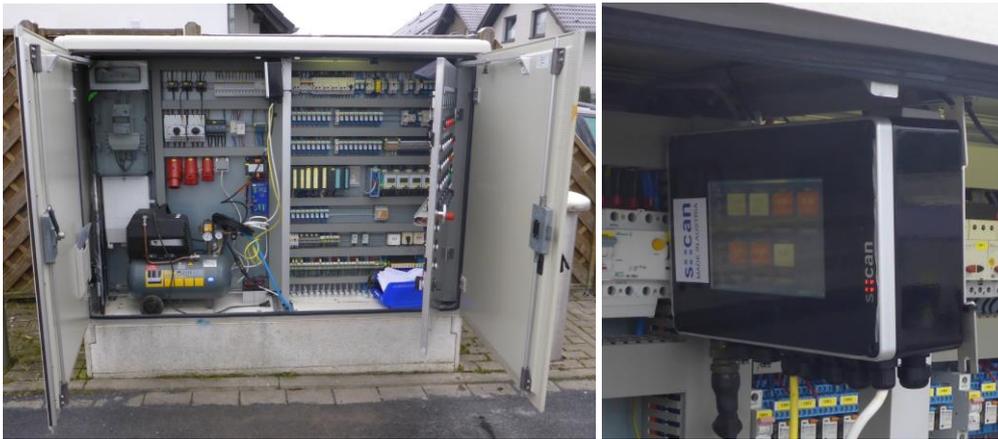


Bild 8 Schaltschrank am RKB Fahrstraße (links) und con::cube (rechts).

4.2.2 Kalibrierung der Spektrometersonde

Die Spektrometermessung wurde zu Beginn des Projektes mit einer vom Hersteller voreingestellten globalen Kalibrierung zur Anwendung im Kläranlagenzulauf betrieben. Erfahrungen aus früheren Messungen haben gezeigt, dass mit dieser Kalibrierung plausible Werte gemessen werden können. Nach vier Monaten wurde für die gemessenen Parameter eine Offset-Kalibrierung durchgeführt, anhand derer die voreingestellte Kalibrierung korrigiert wurde.

Wie sich herausstellte, waren die Konzentrationen im Filterschacht deutlich geringer als erwartet, was dazu führte dass schließlich eine globale Kalibrierung zur Anwendung der Sonde im Kläranlagenablauf verwendet wurde.

4.2.3 Installation des automatischen Probenehmers

Der automatische Probenehmer vom Typ Liquiport 2000 EX wurde auf Wunsch der Stadtbetriebe Hennef direkt im Filterschacht positioniert. Vorteil daran war, dass kein zusätzlicher Schrank zum Schutz vor Witterungseinflüssen und Diebstahl aufgestellt werden musste. Es war jedoch auf diese Weise kein Netzbetrieb des Probenehmers möglich, so dass in regelmäßigen Abständen der Akku getauscht werden musste. Der Ansaugschlauch des Probenehmers wurde in der Verlängerung der Zulaufleitung neben der Spektrometersonde befestigt, damit eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Sonde möglich war.

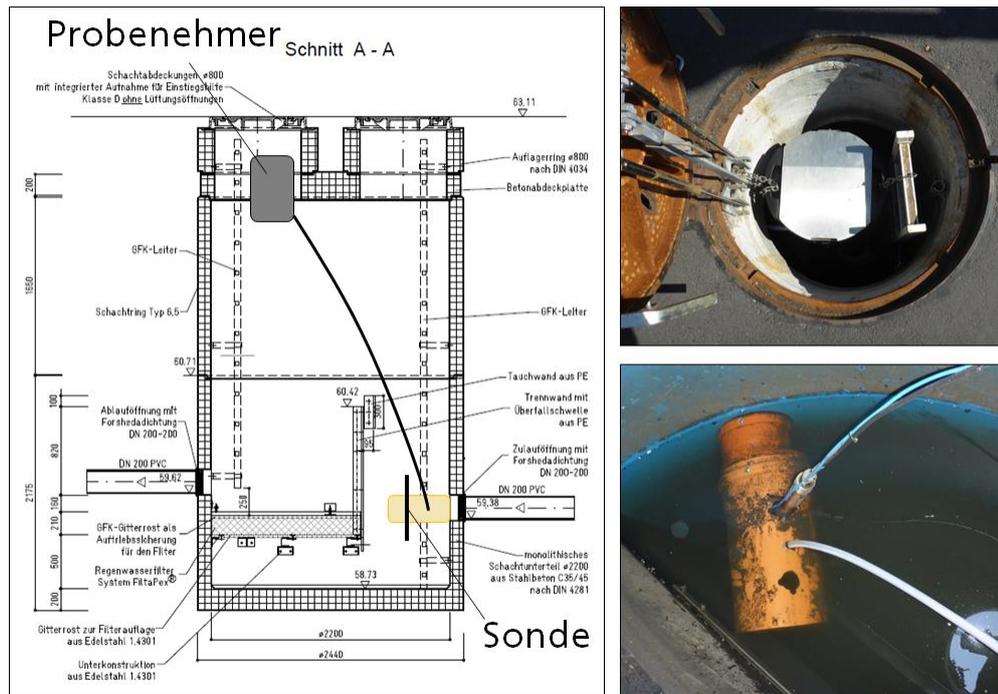


Bild 9 Installation des Probenehmers im Filterschacht Fährstraße

4.3 Messstellenbetrieb und Probenahme

4.3.1 Sondenwartung

Während der Projektlaufzeit wurde ca. alle zwei Wochen eine Wartung der Spektrometersonde durch die Dr. Pecher AG durchgeführt. Im Rahmen der Wartung wurde die Sonde gründlich gereinigt, die aufgezeichneten Daten wurden ausgelesen und im Anschluss daran zeitnah ausgewertet. Weitere Arbeiten, die neben der regelmäßigen Sondenwartung durchgeführt wurden, sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6 Übersicht der Arbeiten am Filterschacht Fährstraße

Monat	Wartung	Sonstige Arbeiten
Januar 2017	1 x	17.01.: Einbau Spektrometersonde
Februar 2017	2 x	
März 2017	3 x	08.03.: Austausch Spektrometersonde
April 2017	1 x	
Mai 2017	3 x	02.05.: Austausch Spektrometersonde (Leihgerät) 10.05.: Filterwechsel
Juni 2017	1 x	20.06.: neue Sondenposition + Einbau zweite Spektrometersonde
Juli 2017	3 x	06.07.: Ausbau Leihgerät 18.07.: Einbau Probenehmer
August 2017	4 x	
September 2017	1 x	
Oktober 2017	3 x	
November 2017	3 x	02.11.: Entleerung Filterschacht 06.11.: Probenentnahme Filtermaterial
Dezember 2017	3 x	
Januar 2018	2 x	
Februar 2018	1 x	01.02.: Installation Füllstandssonde Filterschacht

4.3.2 Filterwartung

Im Rahmen des Projektes konnte anhand der mittels MID gemessenen Durchflüsse die Leistung des Filters überwacht werden. Die kontinuierliche Beobachtung der Durchflussmessung, auf die in Kapitel 5 genauer eingegangen wird, führte dazu, dass das Filtermaterial vier Monate nach Inbetriebnahme komplett ausgetauscht wurde. Anschließend wurde die Filterleistung weiter beobachtet und weitere sechs Monate später erneut eine geringer werdende hydraulische Leistungsfähigkeit festgestellt. Diesmal lag die Vermutung darauf, dass sich ein Biofilm in den Zwischenräumen des Filtermaterials gebildet hat. Aus diesem Grund wurde eine Probe des Materials zur Analyse ins Labor gegeben und gleichzeitig der Filter für mehrere Tag trocken gelegt, in der Hoffnung, dass

ein möglicher Biofilm abstirbt und die Durchlässigkeit wieder ansteigt. Auf die Ergebnisse der Analyse wird ebenfalls in Kapitel 5 eingegangen.

4.3.3 Analyseprogramm

Gemäß Projektantrag war die Beprobung von 10 Ereignissen vorgesehen. Ziel der Probenahme war zum einen die Verifizierung der Ergebnisse der online-Messung und zum anderen die Bewertung des Regenwasserabflusses anhand von verschiedenen Verschmutzungsparametern. In Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln wurden die folgenden Parameter analysiert:

- Abfiltrierbare Stoffe
- Chemischer Sauerstoffbedarf
- TOC
- Kohlenwasserstoffe
- Blei_{gelöst/gesamt}
- Kupfer_{gelöst/gesamt}
- Zink_{gelöst/gesamt}
- Quecksilber_{gelöst/gesamt}
- TNb
- Phosphor
- 4-Formylaminoantipyrin
- Carbamazepin
- Coffein
- Acesulfam
- Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅)
- PAK

4.3.4 Programmierung des Probenehmers

Die Programmierung des Probenehmers wurde unter Berücksichtigung des Ziels der Probenahme, den Möglichkeiten der Signalgabe und den Möglichkeiten des Probenehmers vorgenommen. Ziel war die Entnahme von Proben während der Beschickung des Filters. Dazu sollte der Probenehmer zu Beginn einer Filterbeschickung gestartet werden und nach Möglichkeit bis zur vollständigen Entleerung des RKB in den Filter weiterlaufen. Zu diesem Thema wurde eine Bachelorarbeit von der Dr. Pecher AG betreut, deren Ergebnis das hier angewandte Probenahmekonzept war.

Als Eingangssignal für den Beginn eines Probenahmeprogramms wurde das Erreichen eines Füllstandes von 1,0 m in der Zulaufkammer des Filters festgelegt, da dieser Füllstand bei einer Filterbeschickung sehr schnell überschritten, aber während des Fremdwasserabzugs noch nicht erreicht wird.

Zur Festlegung der Dauer einer Probenahme wurden Ereignisse, bei denen die Entleerung des RKBs ohne Unterbrechung in den Filter geleitet wurde, im Hinblick auf deren Dauer ausgewertet. Diese Auswertung ergab im Zeitraum von Dezember 2016 bis Mitte Juli 2017 einen Mittelwert von 8 h und 33 min. Um einen Großteil dieser Ereignisse abzudecken und die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, bei einer Unterbrechung des Zuflusses eine spätere Beschickung beproben zu können, wurde der Zeitraum der Probenahme auf zehn Stunden festgelegt. In diesem Zeitraum sollte jeweils eine zeitproportionale Probenahme stattfinden, bei der die acht Flaschen mit einem Volumen von je 1,8 l jeweils über einen Zeitraum von 1 h und 15 min befüllt werden. In diesem Zeitraum wurde alle 15 min eine Probe von 320 ml gezogen.

Nach Durchlaufen des Programmes endet dieses automatisch und es erfolgt erst eine erneute Probenahme, wenn der Probenehmer nach einer Entleerung wieder gestartet wird.

5 Ergebnisse der messtechnischen Überwachung der Entleerungsstrategie

5.1 Datenverfügbarkeit

Die messtechnische Überwachung der Entleerungsstrategie beruht auf den Daten der Spektrometersonde und den folgenden im Leitsystem der Stadtbetrieb Hennef AÖR aufgezeichneten Daten:

- Programm: Klarwasserabzug, Restentleerung, Fremdwasserabzug
- Durchfluss in der Entleerungsleitung
- Durchfluss Klärüberlauf
- Trübung
- AFS (Spektrometersonde im Filterschacht)
- Füllstände im RKB
- Meldung Einstau RKB
- Meldung Klärüberlauf
- Füllstände im Filter
- Niederschlag

Die Daten der Spektrometersonde sind für den gesamten Zeitraum von Januar 2017 bis Januar 2018 verfügbar. Für die Auswertungen werden jedoch nur die Daten ab Juni 2017 verwendet, da die zuvor aufgezeichneten Daten aufgrund von Änderungen der Kalibrierung und der Position im Filterschacht nicht zuverlässig ausgewertet werden können.

Die Niederschlagsdaten stehen von Januar – Oktober 2017 vom Niederschlagschreiber der Kläranlage Hennef und ab November 2017 von der weiter östlich gelegenen Kläranlage Dondorf zur Verfügung.

Die Daten aus dem Leitsystem wurden zum Teil ab Ende Dezember 2016 zur Verfügung gestellt. Bis zum 16.01.2017 lagen die Daten jedoch nur in einer zeitlichen Auflösung von 1h zur Verfügung und können für die Auswertung nur eingeschränkt verwendet werden. Aufgrund von technischen Problemen im Leitsystem kam es im März 2017 für den

Zeitraum von einer Woche und vom 02.11.2017 – 15.12.2017 zum Verlust der Daten. Die Daten der Trübungsmessung haben außerdem eine Lücke vom 27.12.2017 – 11.01.2018, da die Sonde in diesem Zeitraum aufgrund eines Defektes ausgebaut werden musste. Nach Wiedereinbau der Sonde kam es noch einmal zu einem Aussetzer am 17./18.01.2018. Auswertbare Daten liegen insgesamt für ca. 10,5 Monate vor.

5.2 Entleerungsereignisse

Von Ende Dezember 2016 bis Ende Januar 2018 wurden 102 Entleerungsereignisse des RKBs messtechnisch erfasst. Als Entleerungsereignis wird jeweils die vollständige Entleerung des RKBs bis zu einem Füllstand von 0,51 m definiert. Ein Entleerungsereignis besteht daher häufig aus mehreren Teilentleerungen. Ereignisse, bei denen der Füllstand im RKB mindestens ein Mal so hoch war, dass das Programm Klarwasserabzug gestartet wurde, sind 55 Mal erfasst worden. Bei 47 Ereignissen wurde ausschließlich im Programm Restentleerung entleert. In Bild 10 ist die messtechnische Erfassung einer vollständigen Entleerung des RKB dargestellt. Bei einem Füllstand im RKB von über 1,48 m springt der Klärüberlauf an und es ist kein Entleerungsprogramm aktiv. Fällt der Füllstand auf 1,48 m, beginnt das Programm Klarwasserabzug und der Beckeninhalte wird für die ersten Minuten in den Schmutzwasserkanal geleitet. Der Durchfluss in der Entleerungsleitung steigt auf 20 l/s an und die Trübungssonde erfasst die Trübung während der Entleerung. Wenn nach mehreren Minuten die Umstellung der Schieber erfolgt, kann ein Füllstandsanstieg im Filterschacht festgestellt werden. Ab diesem Zeitpunkt, misst auch die Spektrometersonde den AFS-Gehalt, des aus dem Becken entleerten Wassers. Die Bereiche, in denen die Werte der Spektrometersonde mit denen der Trübungssonde verglichen werden können, sind hier schwarz dargestellt. In den grau gefärbten Bereichen, misst die Sonde das im Filter stehende Wasser.

Tabelle 7 liefert einen Überblick über die Entleerungsereignisse von Ende Dezember 2016 bis Januar 2018. Über die Anzahl der Ereignisse im November und Dezember 2017 kann aufgrund der Datenlücke keine Aussage getroffen werden. Im Dezember 2017 hat mindestens eine (Teil)Entleerung des RKBs stattgefunden. Diese wurde jedoch nicht im Leitsystem aufgezeichnet, sondern nur durch eine Aktivierung des automatischen Probennehmers festgestellt. Im Zeitraum von Dezember 2017 bis Januar 2018 kam es außergewöhnlich lange aufgrund von Hochwasser in der Sieg zu einem Rückstau in das Kanalnetz, da durch die geschlossenen Hochwassertore kein weiteres Wasser abfließen konnte. Das dadurch im Kanalnetz stehende Wasser wird erst ab einem bestimmten Füllstand abgepumpt, sodass in der Überlaufkammer des RKB ein Füllstand von bis zu 35 cm vorhanden war, der als Rückstau erfasst wurde. Da bei Rückstau keine Entleerung des RKBs stattfindet und alle Programme gestoppt werden, war das RKB für mehrere Wochen voll eingestaut. Im Januar hat eine Teilentleerung stattgefunden. Anschließend war das RKB bis zum Datenende weiterhin voll eingestaut.

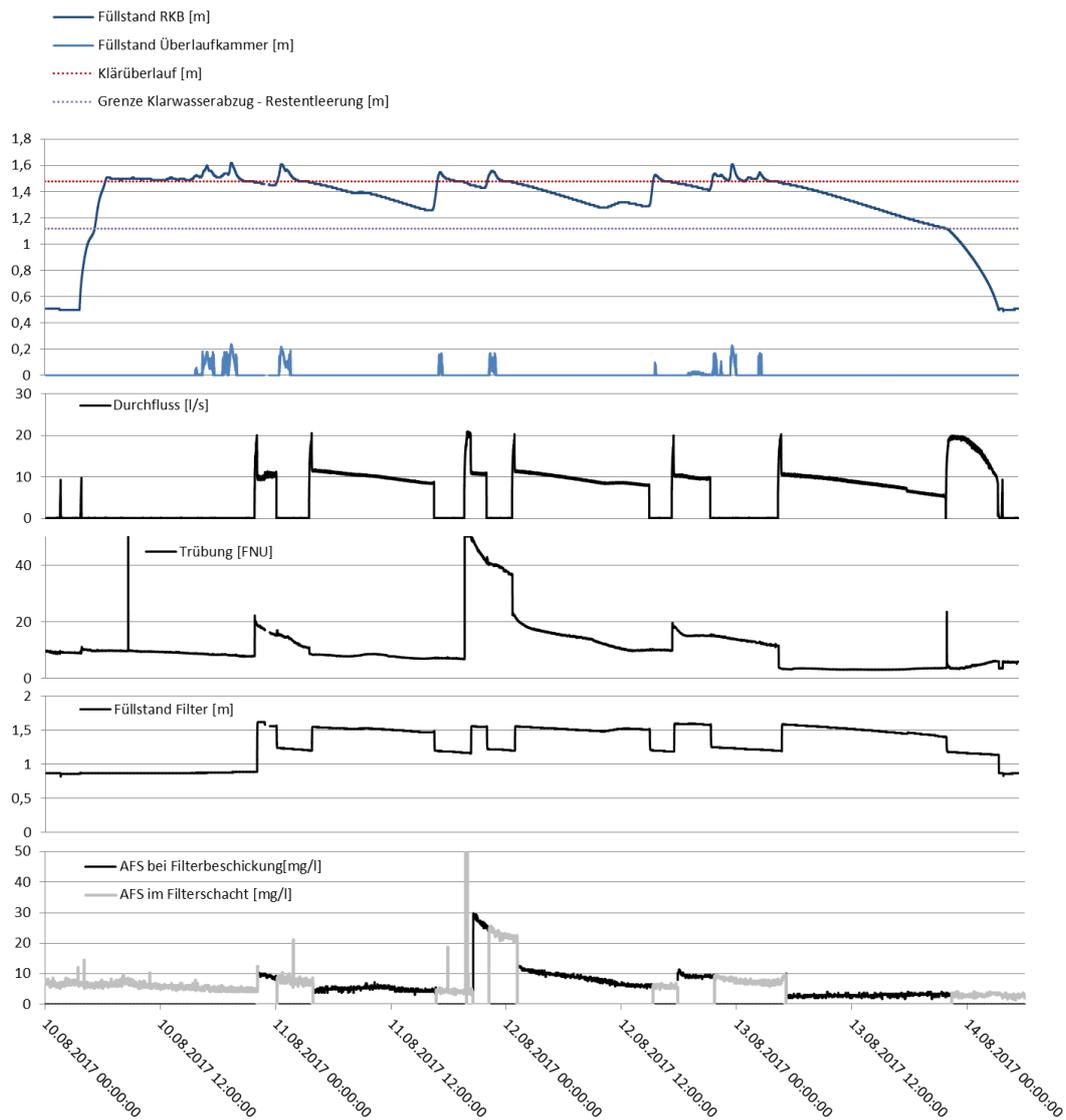


Bild 10 Messtechnische Erfassung einer Entleerung des RKB Fährstraße.

Tabelle 7 Jahresübersicht Entleerungsereignisse RKB Fährstraße

Monat	Entleerungsereignisse		
	Gesamt	Mit Klarwasserabzug	Nur mit Restentleerung
Dezember 2016	1	1	0
Januar 2017	10	7	3
Februar 2017	11	7	4
März 2017	4	3	1
April 2017	4	1	3
Mai 2017	5	4	1
Juni 2017	13	5	8
Juli 2017	11	9	2
August 2017	15	6	9
September 2017	15	6	9
Oktober 2017	12	5	7
November 2017	-	-	-
Dezember 2017	-	-	-
Januar 2018	1	1	-
Summe	102	55	47

5.3 Korrelation von Trübung und AFS

Eine Korrelationsanalyse von Trübung und AFS wurde für die zwischen dem 20.06.2017 und dem 31.01.2018 bei Filterbeschickungen aufgezeichneten Daten durchgeführt. In diesem Zeitraum wurde der Filter bei insgesamt 26 Entleerungsereignissen beschickt. Von diesen 26 Ereignissen konnten fünf Ereignisse nicht ausgewertet werden. Grund dafür war bei drei aufeinander folgenden Ereignissen ein Ausfall der Druckluftreinigung der Spektrometersonde, was zu Fehlmessungen führte. Bei zwei weiteren Ereignissen war die Konzentration an partikulären Stoffen so gering, dass eine Erfassung durch die Spektrometersonde nicht mehr möglich war und unplausible Werte aufgezeichnet wurden.

Die Daten der 21 auswertbaren Entleerungsereignisse wurden von Ausreißern und, aufgrund von Ausfällen, aufgezeichneten Nullwerten bereinigt. Bild 11 zeigt das Ergebnis der Korrelationsanalyse. Für alle, hier farblich unterschiedlich dargestellten, Ereignisse ist ein linearer Zusammenhang festzustellen. Der Korrelationskoeffizient für alle ausgewerteten Daten liegt bei 0,97. Die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Ereignisse sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

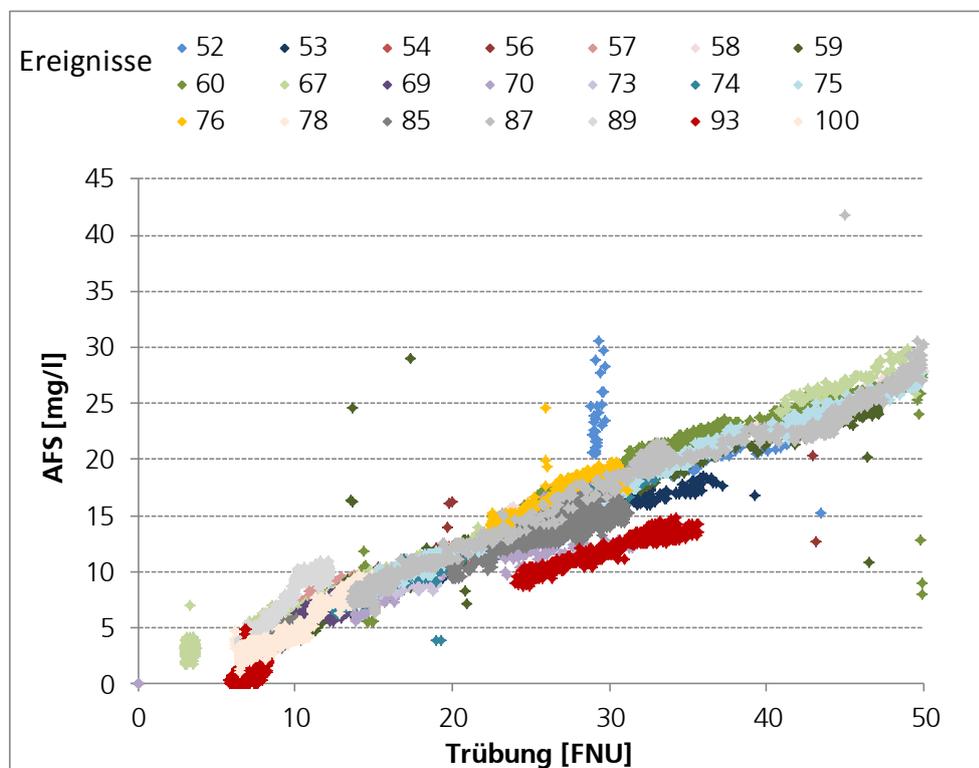


Bild 11 Korrelation: AFS mit Trübung. Farbliche Darstellung zur Unterscheidung zwischen einzelnen Ereignissen.

Tabelle 8 Korrelationskoeffizienten der Gegenüberstellung von AFS und Trübung während der Entleerung über den Filterschacht

Ereignis	52	53	54	56	57	58	59	60	67	69	70
Korrelationskoeffizient	0,96	0,92	0,97	0,99	0,95	0,96	0,99	0,97	0,99	0,67	0,96

Ereignis	73	74	75	76	78	85	87	89	93	100	gesamt
Korrelationskoeffizient	0,79	0,99	0,99	0,95	0,91	0,96	0,99	0,97	1,0	0,86	0,97

5.4 Trübungsmessung

Die Daten der Trübungssonde können für alle Entleerungsereignisse ausgewertet werden. Lediglich die ersten Ereignisse, bei denen die Daten nur stündlich aufgezeichnet wurden, werden nicht berücksichtigt. Aufgrund der Positionierung der Trübungssonde in der Entleerungsleitung, kann auch der Anteil, der nicht über den Filterschacht geleitet wird, ausgewertet werden. Bild 12 zeigt die Verteilung der Trübung in unterschiedlichen Entleerungssituationen. Im ersten Boxplot ist die Verteilung aller Trübungswerte dargestellt, während in den Schmutzwasserkanal entleert wird, ohne Unterscheidung der Entleerungsprogramme. D.h., dass hier alle Werte berücksichtigt werden, die während der ersten Minuten des Klarwasserabzugs, während der gesamten Restentleerung und bei Einleitung in den SW-Kanal durch Überschreitung des Grenzwertes von 50 FNU im Programm Klarwasserabzug gemessen wurden. Die Verteilung dieser Messdaten erstreckt sich über einen Wertebereich von 2,7 bis 50 FNU, wobei die Hälfte der Trübungswerte unterhalb von 24 FNU liegt, was hier einem AFS-Gehalt von ca. 10-15 mg/l entspricht. Die Trübungsmesswerte während der Restentleerung konzentrieren sich zu 50 % auf einen Wertebereich zwischen 11 und 30 FNU. Während des Klarwasserabzugs erstreckt sich dieser Anteil auf Werte im Bereich zwischen 12 und 31 FNU. Die Trübung des über den Filterschacht geleiteten Wassers während des Klarwasserabzugs erstreckt sich über einen Bereich von 3 bis 49,9 FNU, wobei 75 % der Messwerte unterhalb von 28 FNU und fast 50 % unter 17 FNU liegen.

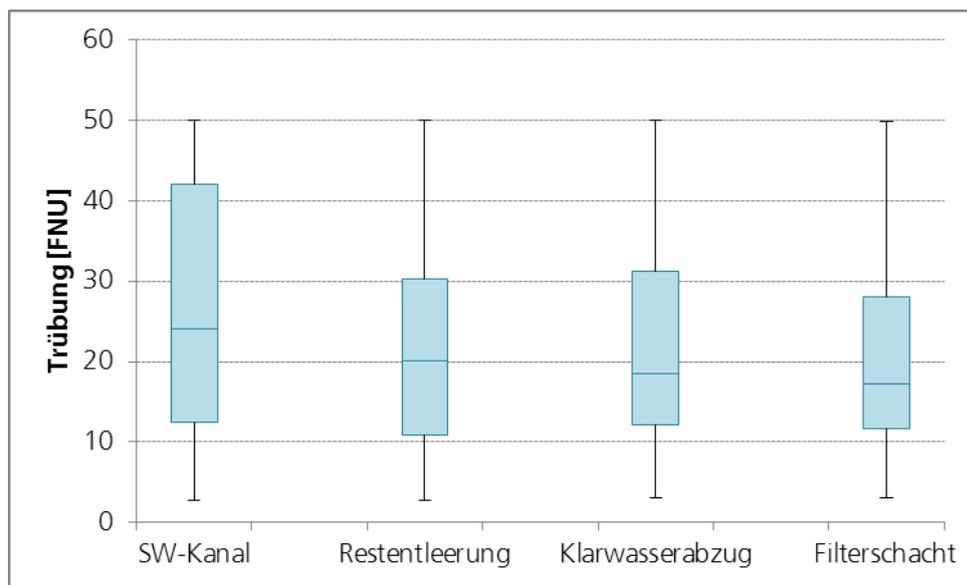


Bild 12 Boxplot Diagramme zur Trübungsmessung in der Entleerungsleitung des RKB. Werte der Trübungsmessung v.l.n.r.: Entleerung in den SW-Kanal, Entleerung im Programm Restentleerung, Entleerung im Programm Klarwasserabzug, Entleerung über den Filterschacht.

5.5 Verteilung des Entleerungsvolumens

Aus dem in der Entleerungsleitung über das MID gemessenen Durchfluss wurde das Volumen berechnet, das während der Entleerungsprogramme in den Schmutzwasserkanal und über den Filterschacht in die Sieg geleitet wurde. In Tabelle 9 sind die Gesamtvolumina je Programm in Richtung Schmutzwasserkanal und Filterschacht sowie das Volumen, das direkt über den Klärüberlauf in Richtung Sieg geleitet wird, zusammengestellt. Hierfür wurden die Daten aus dem Zeitraum Februar 2017 bis Oktober 2017 verwendet. Gründe dafür sind die geringe zeitliche Auflösung der Daten im Januar 2017, der Datenausfall im November/Dezember 2017 und die lange Einstaudauer des RKB im Januar 2018 aufgrund des Hochwassers in der Sieg.

Von dem Gesamtvolumen des RKB werden 26,4 % über die Programme Klarwasserabzug, Restentleerung und Fremdwasserabzug gezielt entleert. 73,6 % werden über den Klärüberlauf direkt in Richtung Sieg geleitet. Durch die Strategie, den Klarwasserabzug über den Filter in das Gewässer zu leiten, wird die Abwasserbehandlungsanlage nur noch mit 12,9 % des Volumens aus dem RKB beschickt.

Für den Zeitraum von Februar 2017 bis Oktober 2017 konnten somit ca. 28.944 m³ Niederschlagswasser an der Behandlungsanlage vorbei in die Sieg geleitet werden. Hochgerechnet auf 12 Monate ergibt sich ein Volumen von fast 40.000 m³ Regenwasser, das nicht behandelt wird.

Mit dieser Strategie ergibt sich nachweislich eine geringere hydraulische Belastung der Kläranlage mit „sauberem“ Regenwasser. Damit ergeben sich freie Kapazitäten und ein stabilerer Betrieb der Anlage (vergl. Ziel 1 des Antrags). Kaltes sauberes Regenwasser führt tendenziell zu einer Reduktion der Reinigungsleistung und hydraulischen Belastung der Kläranlage mit Nachteiligen Effekten hinsichtlich der Energiekosten und der Belastung der Nachklärung.

Eine quantitative Aussage zur Verbesserung der Ablaufwerte und damit Reduktion der Gesamtemission wäre jedoch zukünftig mit einem gekoppelten Modell (Kanalnetz-Kläranlage) und Abbildung der Stofftransport- und Umsetzungsprozesses denkbar.

Tabelle 9 Volumenverteilung bei der Entleerung des RKB inkl. Klärüberlauf für den Zeitraum Februar 2017 – Oktober 2017.

Programm	Volumen			Volumen je Programm [m ³]	Anteil am Gesamtvolumen [%]
	SW-Kanal	Filterschacht	Klärüberlauf		
Klarwasserabzug	5.335,25	28.943,73	1.144,26	35.423,23	16,56
Restentleerung	21.953,16	-	-	21.953,16	10,26
Fremdwasserabzug	208,36	-	-	208,36	0,10
Kein aktives Programm	-	-	156.365,27	156.365,27	73,08
Gesamtvolumen	27.496,76	28.943,73	157.509,53	213.950,02	100,00
Anteil am Gesamtvolumen [%]	12,9	13,5	73,6	100,0	

5.6 Laboranalysen

5.6.1 Probenahmen

Eine Übersicht über die im Rahmen des Projektes analysierten Proben liefert Tabelle 10. Es wurden insgesamt acht Mal, automatisch aus dem Filterschacht entnommene Proben im Labor analysiert. Im Vorfeld wurden händisch genommene Einzelproben aus dem Filterschacht für eine erste Validierung der Online-Messung analysiert. Zusätzlich zum ursprünglich geplanten Probenahmeprogramm wurden außerdem drei Einzelproben aus dem RKB und eine Probe des Filtermaterials im Labor untersucht.

Tabelle 10 Übersicht Probenahmen

Datum	Probe- nahmeart	Ort der Probenahme	Proben- anzahl	Parameter	Labor
10.05.2017	manuell	Filterschacht	3	AFS	bwl
20.06.2017	manuell	Filterschacht	1	AFS, CSB	bwl
24.07.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber, Kohlenwasserstoff-Index	bwl
01.08.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber, Kohlenwasserstoff-Index	bwl
26.08.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Blei gelöst, Kupfer gelöst, Zink gelöst, Quecksilber gelöst, Quecksilber, 4-Formylaminoantipyrin, Carbamazepin, Coffein, Kohlenwasserstoff-Index, Acesulfam	bwl
30.08.2017	manuell	RKB	3	AFS, CSB, TOC, TNb, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber, 4-Formylaminoantipyrin, Carbamazepin, Coffein, Kohlenwasserstoff-Index, Acesulfam	bwl
06.10.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, BSB5, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Blei gelöst, Kupfer gelöst, Zink gelöst, Quecksilber gelöst, Quecksilber, Kohlenwasserstoff-Index	bwl
22.10.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, BSB5, Phosphor, Blei, Kupfer, Zink, Blei gelöst, Kupfer gelöst, Zink gelöst, Quecksilber gelöst, Quecksilber, Kohlenwasserstoff-Index	bwl
06.11.2017	manuell	Filtermaterial	3	Biofilmanalyse	Ruhr-Universität
07.12.2017	automatisch	Filterschacht	8	AFS, CSB, TOC, TNb, BSB5, Phosphor, Schwermetalle gelöst/gesamt, MKW, PAK	Ruhr-Universität
11.01.2018	automatisch	Filterschacht	8	CSB, TOC, TNb, BSB5, Phosphor, Schwermetalle gelöst/gesamt, MKW, PAK	Ruhr-Universität
20.02.2018	automatisch	Filterschacht	8	CSB, TOC, TNb, BSB5, Phosphor, Schwermetalle gelöst/gesamt, MKW, PAK	Ruhr-Universität

5.6.2 Validierung der Online-Messung

Zur Validierung der Online-Messung wurden die im Labor bestimmten Konzentrationen an AFS und CSB den Ergebnissen der Online-Messung gegenübergestellt. Bild 13 zeigt die Gegenüberstellung für die Probenahme vom 24.07.2017. Die prozentuale Abweichung der Messungen ist zwar groß, aber bei den hier gemessenen sehr geringen Konzentrationen, kann kaum eine höhere Genauigkeit erwartet werden. Da die Laborergebnisse in der gleichen Größenordnung wie die online-Messwerte liegen, können die online gemessenen Werte durch die Laboranalysen bestätigt werden.

Die Labor- und Online-Messwerte wurden für insgesamt sechs Probenahmen gegenübergestellt und die Richtigkeit der Spektrometermessung konnte insgesamt bestätigt werden.

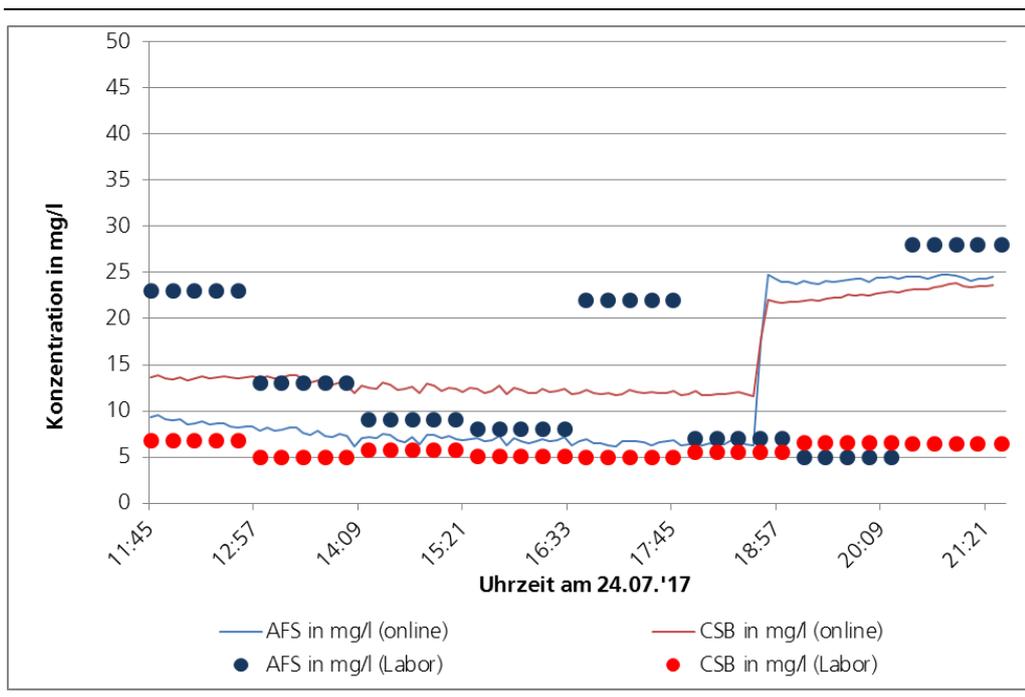


Bild 13 Gegenüberstellung von Labor und online-Messwerten.

5.6.3 Analyse der Verschmutzungsparameter

Die Untersuchungsergebnisse der Summenparameter und Schwermetalle sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Für jede Probenahme wurde je Parameter der Mittelwert aus allen Teilproben gebildet. Liegen alle Teilproben für einen Parameter unterhalb der Bestimmungsgrenze, ist dieser Wert in der Tabelle eingetragen. Liegen nur einzelne Teilproben unterhalb der Bestimmungsgrenze, wurden die betreffenden Teilproben bei der Bestimmung des Mittelwertes nicht berücksichtigt.

Tabelle 11 Mittelwerte der Analyseergebnisse für die Proben P1 bis P8.

Parameter	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
AFS [mg/l]	14,4	5,8	27,9	44,4	39	9,8	-	-
TOC [mg/l]	5,8	5,3	5,9	5,1	5,5	5,6	-	4,4
TNb [mg/l]	1,3	1,0	1,3	< 2	1,6	2,1	-	1,9
CSB [mg/l]	22,3	26,6	15,0	25,5	19,9	18,7	< 15	18,3
Blei [mg/l]	0,051	0,017	0,018	0,032	0,025	0,008	0,0097	0,014
Blei, gelöst [mg/l]	-	-	0,012	0,006	0,01	0,011	0,01	0,022
Kupfer [mg/l]	0,027	0,024	0,025	0,029	0,041	0,025	0,0134	0,031
Kuper, gelöst [mg/l]	-	-	0,016	0,012	0,035	0,024	0,005	0,018
Zink [mg/l]	0,144	0,133	0,127	0,124	0,165	0,175	0,082	0,164
Zink, gelöst [mg/l]	-	-	0,113	0,069	0,152	0,185	0,046	0,169
Quecksilber [mg/l]	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Quecksilber, gelöst [mg/l]	-	-	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Phosphor [mg/l]	0,156	0,064	0,051	< 0,1	0,075	0,135	0,255	0,076
MKW [mg/l]	0,07	0,05	< 0,1	< 0,1	0,14	0,4	0,25	-
BSB5 [mg/l]	-	-	-	< 3	3,3	< 3	-	< 3

Für eine vergleichbare Einschätzung des Verschmutzungszustandes der analysierten Proben, werden die Analyseergebnisse in Tabelle 12 den Vergleichswerten des LANUV aus dem Lagebericht Abwasser für ein Trenn- bzw. Mischsystem gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Probenahme werden dabei durch den Minimal- und Maximalwert aller Teilproben eingegrenzt. Zum Großteil liegen die Werte aus dem Filterschacht Fährstraße

deutlich unterhalb der Vergleichswerte des LANUV. Die maximale Bleikonzentration liegt mit 0,151 mg/l über den Vergleichswerten. Mit 0,097 mg/l liegt die zweithöchste Konzentration noch knapp über den Vergleichswerten. Die Ergebnisse der anderen Teilproben liegen jedoch für den Parameter Blei unterhalb der Vergleichswerte. Das Maximum der Teilproben für Quecksilber beträgt 0,00016 mg/l. Bis auf diesen Wert, lagen alle Analyseergebnisse für Quecksilber unterhalb der Nachweisgrenze.

Tabelle 12 Messergebnisse der Probenahmen aus dem Filterschacht Fährstraße und Vergleichswerte

Parameter	Minimum - Maximum Probenahme	Vergleichswerte LANUV: Lagebericht Abwasser Trennsystem, Straßen	Vergleichswerte LANUV: Lagebericht Abwasser Mischsystem
AFS [mg/l]	< 5 - 76	85	100
TOC [mg/l]	1,9 - 8,7	25	35
TNb [mg/l]	1,3 - 3,0	4	8
Blei [mg/l]	< 0,002 - 0,151	0,095	0,055
Kupfer [mg/l]	< 0,003 - 0,056	0,065	0,09
Zink [mg/l]	0,038 - 0,21	0,43	0,387
Quecksilber [mg/l]	< 0,00005 - 0,00016	0,00001	0,00002
Phosphor [mg/l]	0,04 - 0,679	1	2

Die Untersuchungsergebnisse für 16 verschiedene PAK, die in erster Linie durch den Verkehr in den Regenabfluss gelangen können, sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die Maximalkonzentration je Probenahme aus vier Teilproben. 12 von 16 Stoffen liegen bei allen Teilproben unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,02 µg/l. Nur Naphthalin, Phenanthren, Fluoranthen und Pyren sind in einzelnen Proben nachweisbar. Zur Einordnung können die von Wicke et al. (2016) gemessenen PAK im Regenwasserabfluss Berlins herangezogen werden. Naphthalin sticht bei den Vergleichswerten nicht durch besonders hohe Konzentrationen hervor, liegt aber auch bei den vorliegenden Messungen nur knapp oberhalb der Nachweisgrenze. Phenanthren kommt mit einem Maximum von 0,09 µg/l im Vergleich zu den Konzentrationen in Berlin von bis zu über 0,5µg/l ebenfalls nur in geringer Höhe vor. Fluoranthen und Pyren wiesen in Berlin maximale Konzentrationen von 3,2 bzw. 2,9 µg/l auf. Im Vergleich dazu sind die hier gemessenen 0,03 bzw. 016 µg/l sehr gering.

Tabelle 13 Untersuchungsergebnisse PAK. Maximalwerte je Probenahme.

Parameter [$\mu\text{g/l}$]	P6	P7	P8
Benz[a]pyren, Benz[b]fluoranthren, Benz[k]fluoranthren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Benz[g,h,i]perylen, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Anthracen, Benz[a]anthracen, Chrysen, Dibenz[a,h]anthracen	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Naphthalin	< 0,02	< 0,02	0,05
Phenanthren	< 0,02	< 0,02	0,09
Fluoranthren	< 0,02	< 0,02	0,03
Pyren	0,02	< 0,02	0,16

Gemäß Projektantrag war außerdem die Bestimmung des AFS-Feinanteils geplant. Nach Aussage des Labors der Ruhr-Universität Bochum kann diese Analyse für die aus dem Filterschacht entnommenen Proben, aufgrund der geringen Konzentrationen, nicht erfolgen.

5.6.4 Organische Spurenstoffe

Das bei Trockenwetter im RKB stehende Wasser und die erste Probe der automatischen Probenahme vom 26.08.2017 wurden auf die Spurenstoffe FAA, Carbamazepin, Coffein und Acesulfam untersucht. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14 Analyseergebnisse Schmutzwassertracer

	RKB Oberflächenwasser	RKB durchmischt	Zulauf Filterschacht
4-Formylaminoantipyrin (ng/l)	< 5	< 5	< 5
Carbamazepin (ng/l)	52 – 59	55	< 5
Coffein (ng/l)	2700 – 5800	7200	150
Acesulfam ($\mu\text{g/l}$)	0,8 – 0,9	1,2	< 0,1

5.6.5 Biofilmanalyse

Die Untersuchung des Filtermaterials auf eine Biofilmbildung wurde im Labor des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die Bildung eines Biofilms konnte dabei nur für die Filtermatte bestätigt werden. Diese war gemäß Ergebnisbericht stark bewachsen und der Innenbereich des Materials von Biofilm durchdrungen. Auf dem gekörnten Filtermaterial konnte ebenfalls Biomasse festgestellt, aber keine klare Aussage darüber getroffen werden, ob es sich um einen gewachsenen Biofilm handelt.

5.7 Filterbetrieb

Der Betrieb des Filters wurde über den gesamten Messzeitraum anhand der Füllstände auf der Zu- und Ablaufseite des Filterschachts und des in der Entleerungsleitung des RKBs gemessenen Durchflusses beobachtet. In Bild 14 sind die Mittelwerte dieser Messreihen je Filterbeschickung dargestellt. Die Verbindung der Punkte dient ausschließlich der Übersichtlichkeit und liefert keine Informationen über den Zeitraum zwischen den Filterbeschickungen.

Bei Inbetriebnahme des Filters im Dezember 2016 liegen die Füllstände auf der Zu- und Ablaufseite des Filterschachts auf einem Niveau von ca. 1,10 m und die Entleerung aus dem RKB erfolgt mit einem Durchfluss von ca. 20 l/s. Der mittlere Füllstand auf der Ablaufseite des Filters bleibt über die nächsten Monate in einem Bereich zwischen 1,0 und 1,20 m, während der mittlere Füllstand auf der Zulaufseite immer weiter, bis auf 1,69 m ansteigt, was der Höhe der Überlaufschwelle entspricht. Gleichzeitig sinkt der Durchfluss nach wenigen Filterbeschickungen rapide auf ein Niveau von ca. 12 l/s. Im Zeitraum von zwei bis fünf Monaten nach Inbetriebnahme des Filters sinkt der Durchfluss weiter auf Werte zwischen 5 und 10 l/s.

Durch einen Filterwechsel am 10. Mai 2017 steigt der mittlere Durchfluss wieder auf 20 l/s an und der mittlere Füllstand in der Zulaufkammer gleicht sich wieder dem Füllstand in der Ablaufkammer an. Über die nächsten Monate können die gleichen Beobachtungen wie vor dem Filterwechsel angestellt werden. Nach ca. 2,5 Monaten pendeln sich der mittlere Füllstand in einem Bereich zwischen 1,42 und 1,64 m und der Durchfluss zwischen 6 und 11 l/s ein.

Eine Trockenlegung des Filterschachts am 2. November 2017 für zwei Wochen hat zur Folge, dass der Durchfluss wieder ansteigt und der mittlere Füllstand in der Zulaufkammer absinkt. Aufgrund des längeren Datenausfalls im November und Dezember 2017, fehlen in Bild 14 die Daten der ersten Filterbeschickungen nach Trockenlegung und die Darstellung beginnt im Januar, also einen Monat nach Wiederinbetriebnahme des Filters.

Bild 15 zeigt den Zustand des Filters vor dem Wechsel (links) mit auffälligen Schlammablagerungen auf der sichtbaren Oberseite und zum Vergleich das neu eingesetzte Filtermaterial (Mitte). Am 2. November 2017 (rechts) sind wieder Ablagerungen zu erkennen.

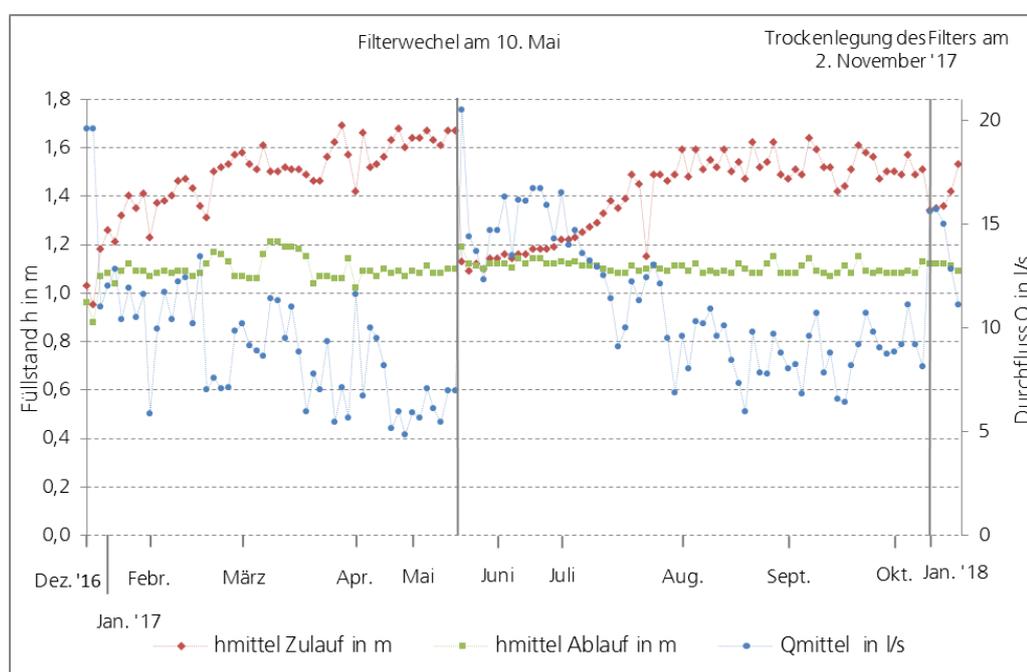


Bild 14 Filterbetrieb



Bild 15 Filter. V.l.n.r.: vor Filterwechsel am 10.05.17, nach Filterwechsel am 10.05.17, während der Trockenlegung am 02.11.2017.

6 Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von online-Spektrometernmessungen und online-Trübungsmessungen

Online-Spektrometernmessungen sind, wie die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie die Erfahrungen der Dr. Pecher AG aus früheren Projekten und den in Hennef durchgeführten Messungen gezeigt haben, eine zuverlässige und geeignete Methode zur Bestimmung der Verschmutzung von Niederschlagswasser. Für einen stabilen Betrieb der Online-Messtechnik sind regelmäßige Wartungen und Kontrollen erforderlich. Zum einen sollte die Sonde zusätzlich zu der automatischen Druckluftspülung regelmäßig händisch gereinigt werden, um Ablagerungen im Messspalt zu entfernen. Eine regelmäßige Kontrolle der Messdaten ist außerdem erforderlich, damit unplausible Messungen, wie hier durch eine ungeeignete Kalibrierung zu Beginn, erkannt und behoben werden können.

Die Trübungsmessung hat in diesem Einsatzfall ebenfalls sehr zuverlässige und stabile Messwerte geliefert, wie die gute Korrelation zwischen den Werten der beiden Messmethoden belegt. Aufgrund der guten Ergebnisse und des geringeren Aufwandes, wird empfohlen die Entleerung des RKB Fährstraße zukünftig nur noch mithilfe der Trübungsmessung zu betreiben. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich diese Aussage nicht ohne weitere Prüfung auf andere Einsatzfälle übertragen lässt.

7 Bewertung der Wirkung und Wartungserfordernisse eines Filtersystems in der Entleerungsleitung der Regenwasserbehandlungsanlage

Das Filtersystem in der Entleerungsleitung des RKB Fährstraße ist sehr anfällig für Kolmation, was zu einem deutlich erhöhten Wartungsaufwand gegenüber anderen Filterschächten führt. Für einen störungsfreien Betrieb müsste der Filter an diesem Standort etwa zwei Mal pro Jahr gewechselt werden.

Die grundsätzliche Erfordernis eines nachgeschalteten Filters ist auf Grundlage der Messergebnisse fraglich. Die online und im Labor gemessenen Verschmutzungsparameter liegen, vor allem im Vergleich mit einschlägigen Literaturwerten, in einem sehr niedrigen Bereich. Die geringe Verschmutzung des Zuflusses lässt sich entweder auf einen vergleichsweise sauberen Niederschlagswasserabfluss oder auf eine gute Vorreinigung durch das RKB zurückführen. Trotzdem lässt die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters bereits nach wenigen Betriebsmonaten deutlich nach. Die Ursache für die Kolmation des Filters konnte im Rahmen des Projektes nicht abschließend geklärt werden. Im Folgenden werden Hypothesen aufgestellt, was zur Verringerung der Durchlässigkeit des Filters geführt haben kann.

Zur Durchführung des Pilotprojektes war es erforderlich, das über den Klarwasserabzug ausgeleitete Wasser vor der Einleitung in das Gewässer weitergehend zu behandeln. Aus diesem Grund musste in das bestehende System (RKB – Mess- und Schieberschacht – weiterführende Kanäle) ein Filterschacht integriert werden. Durch die damit verbundene Vielzahl an vorgegebenen Randbedingungen, vor allem hinsichtlich der Höhen- und Platzverhältnisse, konnte der Schacht zwar regelgerecht dimensioniert werden. Eine „hydraulische Reserve“ konnte bei der Auslegung allerdings nicht berücksichtigt werden. Damit unterscheidet er sich hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung von anderen Filterschächten. Diese Besonderheit wird dazu beitragen, dass der Filter auf Beeinflussungen des Porenraumes sensibel reagiert und damit die hydraulische Leistungsfähigkeit schneller als gemäß den üblichen Erfahrungen nachlässt.

Im Rahmen der Wartungstermine wurde der Filterschacht zweimal vollständig ausgesaugt. Dabei zeigte sich, dass die Sohle des Schachtes sehr sauber war und es zu keiner nennenswerten Sedimentation von Stoffen im Schlammfang gekommen war. Dies legt die Vermutung nahe, dass die eingetragenen Stoffkonzentrationen bei Beschickungsereignissen in sehr feinen Bestandteilen vorlagen. Diese feinen Bestandteile können durch die vorhandene Strömung nicht oder nur in sehr geringem Umfang sedimentieren und gelangen zu großen Teilen in den Filterkörper. Es kann vermutet werden, dass der Filterkörper am Standort Fährstraße trotz der geringen Zuflusskonzentrationen durch feine Bestandteile und die geringe Wirksamkeit des Schlammfanges ähnlich stark wie eine Vergleichsanlage an einem anderen Standort beansprucht wird.

Des Weiteren ist bekannt, dass durch das RÜB Reutherstraße planmäßig entlastetes Mischwasser in das System eingetragen wird. Für den Zeitraum vom 01.01.2017 bis zum 08.11.2017 liegen Daten zum Abschlagsverhalten des RÜB vor. Demnach haben 23 Entlastungsereignisse mit einer Gesamtmenge von 22.380 m³ stattgefunden. Aufgrund dessen handelt es sich nicht um ein klassisches, reines Trennsystem. Durch den vermehrten Eintrag von organischen Stoffen liegt die Vermutung nahe, dass diese eine Biofilmbildung im anorganischen Filtermaterial begünstigen. Der maßgebende Indikator für Mischwasser ist der CSB. Aber auch eine erhöhte AFS-Konzentration kann Hinweise liefern. Im Rahmen einer bei der Dr. Pecher AG durchgeführten Masterarbeit wurde u.a. untersucht, ob es trotz der grundsätzlich sehr geringen AFS- und CSB-Konzentrationen im Filterschacht einen erkennbaren Zusammenhang zwischen Konzentrationsanstiegen im Filter und Abschlägen aus dem RÜB gibt. Dazu wurden die AFS- und CSB-Konzentrationen der Beschickungsereignisse, die aufgrund von Abschlägen aus dem RÜB durch Mischwasser beeinflusst sein könnten mit denen verglichen, bei denen kein Mischwassereinfluss vorlag. Zur Bewertung des komplexen Sachverhaltes musste zusätzlich beachtet werden, dass jedes Entlastungsereignis des RÜB Reutherstraße auch zu einer vollständigen Füllung des RKB und Entlastung über die Schwelle führte. Dadurch wird bereits ein Teil des Mischwassers aus dem System ausgetragen. Die Vermischung des entlasteten Mischwassers mit Regenwasser und die Fließzeit im System sind hier zusätzlich von Bedeutung. In der Ergebnisbetrachtung zeigt sich, dass die Abweichungen der AFS- und CSB-Konzentrationen zwischen den jeweiligen Ereignissen im einstelligen Prozentbereich liegen und damit vernachlässigbar sind. Die Konzentrationsuntersuchungen zeigen letztlich keinen eindeutigen Zusammenhang.

Am 2. November 2017 wurden die Schieber zum Filter geschlossen und der Schacht vollständig entleert. Ziel dieser Maßnahme war es, ein Austrocknen des Filtermaterials zu bewirken. Durch das aerobe Milieu sollte eine Reduzierung der Biomasse erfolgen. Zeitgleich wurden Proben des Filtermaterials entnommen und im Labor für Siedlungswasserwirtschaft der Ruhr-Universität Bochum einer Biofilmanalytik unterzogen. Nach zwei Wochen wurden die Schieber wieder geöffnet und der Schacht erneut beaufschlagt. Die Filterbeschickung vom 18. November 2018 zeigt einen deutlichen Anstieg des Durchflusses gegenüber dem Zeitraum vor der Austrocknung. Durch die Biofilmanalyse konnte ein dichter Biofilm vor allem auf und in der Schaumstoffmatte nachgewiesen werden. Auf der Unterseite war ein lichter Bewuchs erkennbar. Nach Einschätzung des Labors beeinträchtigt der Biofilm die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters erheblich. Die Steigerung des Durchflusses nach Trockenlegen des Filters ist ein weiteres Indiz für den Einfluss durch einen biologischen Bewuchs.

Vermutungen des Kanalbetriebes, dass eine Beeinflussung der Durchlässigkeit durch Verlegung/Verschlämmung des Filters durch klebrige Substanzen, zurückzuführen auf Reifenabrieb, gegeben sei, konnten nicht bestätigt werden. Ablagerungen dieser Art, die

bei einer Reinigung des RKBs beobachtet wurden konnten im Filterschacht nicht nachgewiesen werden.

8 Vorschlag einer Betriebsstrategie

Die zu Beginn des Projekts vorgeschlagene Entleerungsstrategie wurde erfolgreich umgesetzt und messtechnisch überwacht. Anhand der Laboranalysen und der kontinuierlichen Überwachung durch die online-Messtechnik, wurde eine über den gesamten Entleerungsvorgang sehr geringe Verschmutzung festgestellt. Wie in Bild 12 zu sehen ist, verteilen sich die Trübungsmesswerte während Klarwasserabzug und Restentleerung auf einen ähnlichen Bereich. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass der Filter vor allem mit klarem Wasser beschickt wird und die höheren Trübungswerte vor allem in dem Teil gemessen werden, der zur Abwasserbehandlungsanlage geleitet wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass mithilfe der bereits angewandten Entleerungsstrategie, das Ziel weniger klares Wasser in die Behandlungsanlage zu leiten erreicht wird. Neben den höheren Trübungsmesswerten, wird ein Anteil von über 50 % mit Trübungswerten unterhalb von 30 FNU weiterhin in den Schmutzwasserkanal geleitet. Dieses Volumen kann weiter verringert werden, wenn auch während der Restentleerung über den Filterschacht entleert wird, solange die Trübung unterhalb von 50 FNU liegt.

Mit der aktuellen Entleerungsstrategie liegt der Anteil des Entleerungsvolumens der nicht mehr in den Schmutzwasserkanal geleitet wird bei 51,3 % (Tabelle 15). Durch eine Ausweitung der Entleerung über den Filterschacht während der Restentleerung, kann dieser Anteil auf 82,0 % erhöht werden (Tabelle 16).

Tabelle 15 Volumenverteilung bei der gesteuerten Entleerung des RKB für den Zeitraum Februar 2017 – Oktober 2017.

Programm	Volumen		Volumen je Programm [m³]	Anteil am Gesamtvolumen [%]
	SW-Kanal	Filterschacht		
Klarwasserabzug	5.335,25	28.943,73	34.279,0	60,7
Restentleerung	21.953,16	-	21.953,16	38,9
Fremdwasserabzug	208,36	-	208,36	0,40
Gesamtvolumen	27.496,76	28.943,73	56.440,5	100,00
Anteil am Gesamtvolumen [%]	48,7	51,3	100,0	

Tabelle 16 Mögliche Volumenverteilung bei Ausweitung der gesteuerten Entleerung des RKB auf die Restentleerung für den Zeitraum Februar 2017 – Oktober 2017.

Programm	Volumen		Volumen je Programm [m³]	Anteil am Gesamtvolumen [%]
	SW-Kanal	Filterschacht		
Klarwasserabzug	5.335,25	28.943,73	34.279,0	60,7
Restentleerung	4.636,5	17.316,7-	21.953,16	38,9
Fremdwasserabzug	208,36	-	208,36	0,40
Gesamtvolumen	10.180,1	46.260,4	56.440,5	100,00
Anteil am Gesamtvolumen [%]	18,0	82,0	100,0	

9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Entleerungsstrategie liegt eine Berechnung der mengenabhängigen Kosten zur Behandlung von Niederschlagswasser der Stadtbetriebe Hennef zugrunde. Die Berechnung der mengenmäßigen Kosten berücksichtigt die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zur Abwasserbehandlung, die Belastung der Anlage und die Stromkosten. Demnach betragen die Kosten für die Behandlung in der Kläranlage 0,13 €/m³. Bei weiterem Betrieb eines Filters wird mit Kosten von ca. 2.000,00 € pro Filterwechsel gerechnet. Die Einsparmöglichkeiten und Kosten für eine Fortführung der aktuellen Entleerungsstrategie und der Strategie auch die Restentleerung über den Filterschacht zu entleeren, sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 zusammengestellt. Je nach Strategie können 1.160,00 bzw. 4.247,00 € pro Jahr eingespart werden.

Tabelle 17 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Entleerung des RKBs mit Klarwasserabzug in die Sieg

Position	Betrag	Einheit	Menge [m ³] / [St.]		Kosten / Einsparung [€]	
			Durchschnitt pro Monat	Pro Jahr	Pro Monat	Pro Jahr
Behandlung in der Kläranlage	0,13	€/m ³	3.308	39.695	-430,00	-5.160,00
Filterwechsel	2.000,00	€/St.	0,167	2	334,00	4.000,00
					-96,00	-1.160,00

Tabelle 18 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Entleerung des RKBs mit Klarwasserabzug und Restentleerung in die Sieg

Position	Betrag	Einheit	Menge [m³] / [St.]		Kosten / Einsparung [€]	
			Durchschnitt pro Monat	Pro Jahr	Pro Monat	Pro Jahr
Behandlung in der Kläranlage	0,13	€/m³	5.287,00	63.442	-687,00	-8.247,00
Filterwechsel	2.000,00	€/St.	0,167	2	334,00	4.000,00
					-353,00	-4.247,00

10 Zusammenfassung

Veranlassung für die Durchführung des Pilotprojekts war die erhöhte hydraulische Belastung der Pumpstationen, des Kanalnetzes und der Kläranlage durch den Anschluss zahlreicher Regenklärbecken an die Schmutz- und Mischwassernetze. Die Stadtbetriebe Hennef haben in einem ersten Schritt eine stadtgebietsweite integrierte Entleerungsstrategie entwickelt, die eine optimierte Entleerung der Bauwerke unter hydraulischen Gesichtspunkten sicherstellt. Im Rahmen des Pilotprojektes sollte die Entleerungsstrategie unter stofflichen Gesichtspunkten weiterentwickelt und durch eine messtechnische Überwachung bewertet werden (Ziel 1 + 2).

Die Möglichkeiten der online-AFS Messung wurden recherchiert (Ziel 3), mit dem Ergebnis dass sowohl Spektrometer- als auch Trübungssonden zum Einsatz kommen können. Bei der Verwendung einer Trübungssonde muss jedoch im Vorfeld ein spezifischer Zusammenhang von Trübung und AFS für den jeweiligen Einsatzort ermittelt werden.

Zur Umsetzung des Vorhabens wurde das RKB Fährstraße so umgebaut, dass ein trübungsabhängig gesteuerter Abzug der Klarwasserzone über einen technischen Filter in die Sieg möglich war. Die Verunreinigung des Wassers durch partikuläre Stoffe, wurde durch eine Trübungssonde in der Entleerungsleitung und eine Spektrometersonde im Filterschacht überwacht. Beide Messungen haben während der gesamten Entleerung nur geringe Verschmutzungen durch partikuläre Stoffe erfasst, was auch durch mehrere im Labor analysierte Proben bestätigt werden konnte. Auch die Laboranalyse auf weitere Verschmutzungsparameter, ergab im Vergleich zu aktuellen Werten aus der Literatur ein geringes Vorkommen von Verunreinigungen im Niederschlagswasser.

Durch die Anwendung der optimierten Entleerungsstrategie, konnten ca. 51 % des andernfalls in den Schmutzwasserkanal entleerten Volumens über den Filterschacht in die Sieg geleitet werden. Da anhand der Trübungsmessung auch während der Restentleerung aus dem RKB eine geringe Verschmutzung nachgewiesen wurde, wird empfohlen in Zukunft auch diesen Anteil in die Sieg zu entleeren. Auf diese Weise kann der Anteil, der nicht in den Schmutzwasserkanal geleitet wird, auf ca. 82 % erhöht werden. Durch die Reduktion der Belastung der Kläranlage mit „sauberem“ Regenwasser, wird diese hydraulisch entlastet, was zu einer effizienteren Reinigungsleistung und damit zu einer stofflichen Entlastung des Gewässers führt (Ziel 1). Quantitative Aussagen sind zukünftig mit gekoppelten Kanalnetz-Kläranlagenmodellen denkbar, die Stofftransport und Umsetzungsprozesses beschreiben.

Die Erfordernis eines Filtersystems in der Entleerungsleitung (Ziel 5) konnte im Rahmen des Projektes nicht abschließend geklärt werden. Trotz der messtechnisch erfassten geringen Verunreinigung des Wassers, lässt die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters

relativ schnell nach. Die Vermutung der oberhalb liegenden Mischwasserentlastung als Ursache für die Kolmation des Filters, konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden

Die Eignung von Online-Spektromettermessungen und Online-Trübungsmessungen zur Ermittlung der Verschmutzung von Niederschlagswasser, konnte im Rahmen des Projektes bestätigt werden (Ziel 4). Insgesamt war ein stabiler Messbetrieb möglich und zwischen den Messwerten der beiden unterschiedlichen Sonden, konnte ein eindeutiger linearer Zusammenhang festgestellt werden. Aus diesem Grund ist es möglich in Zukunft lediglich die Trübungsmessung an diesem Einsatzort zu verwenden.

Erkrath, den 05.12.2019

Hennef, den 05.12.2019

DAB/STK

DR. PECHER AG

Stadtbetriebe Hennef AöR

Dr. Holger Hoppe

Manfred Thomé

Literaturverzeichnis

- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2004) TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables. *Water Science and Technology*, 50(11), 81–88.
- Caradot, N., Sonnenberg, H., Rouault, P., Gruber, G., Hofer, T. Torres, A., Pesct, M. und Bertrand-Krajewski, J.-L. (2014) Influence of local calibration on the quality of Online wet weather discharge monitoring: Feedback from five international case studies. 13th international conference on urban drainage, Sarawak, Malaysia, 7 – 12 September 2014.
- Din EN ISO 7027-1:2016-11 (2016) Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der Trübung – Teil 1: Quantitative verfahren (ISO 7027-1:2016), Deutsche Fassung EN ISO 7027-1:2016.
- DWA (2013) Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und –rückhaltung. – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. DWA, Hennef. ISBN 978-3-942964-50-0.
- DWA (2016) Gelbdruckvorlage DWA-A 102 – Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft
- Gruber, G., Gamerith, V., Pressl, A., Winkler, S. und Ecker, M. (2008) Erfahrungen mit dem Einsatz von Multispektrometersonden im Kanal.
- Hannouche, A., Chebbo, G., Ruban, G., Tassin, B., Lemaire, B. J. und Joannis, C. (2011) Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Science and Technology*, 64(12), 2445-2452.
- Lawler, D. M., Foster, I. D., Petts, G. E., Harper, S. und Morrissey, I. P. (2006) Suspended sediment dynamics for June storm events in the urbanized River Tame, UK. IAHS Publ. 306.
- MUNLV (2004) Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren.
- Prien, S. und Kaletka, J. (2013) Steuerungsstrategie zur Entleerung von Regenklärbecken. In: *abwasser report 2.13. der KommunalAgenturNRW, Düsseldorf*

Raith, K. I., Hoppe, H., Kutsch, S., Ante, J. und Massing, C. (2017) Qualitätsabhängige Kanalnetzsteuerung – Konzeption und Umsetzung lokaler und stadtgebietsweiter Steuerungsstrategien. Leitfaden Version 1

Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B. und Grathwohl, P. (2013) Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. *Environmental Earth Science*, 69, 373-380.

Rymszewicz, A., O'Sullivan, J. J., Bruen, M., Turner, J., Lawler, D., Conroy, E. und Kelly-Quinn, M. (2017) Measurement differences between turbidity instruments, and their implications for suspended sediment concentration and load calculations: A sensor inter-comparison study. *Journal of Environmental Management*, 199, 99-108.

s::can Messtechnik GmbH (2018) Intelligent. Optisch. [online] <http://s-can.at/de/produkte>, 02.03.2018.

Sun, S., Barraud, S., Castebrunet, H., Aubin, J.-B. und Marmonier, P. (2015) Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment. *Water Research*, 85, 432-442.

Wicke, D., Matzinger, a. und Rouault, P. (2016) Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. KompetenzZentrum Wasser Berlin gGmbH, Berlin.